

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# APLIKACE ELEKTROEROZIVNÍHO HLOUBENÍ PŘI TECHNOLOGII VÝROBY VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK SK

THE APPLICATION OF ELECTRICAL DISCHARGE SINKING AT TECHNOLOGY OF  
PRODUCTION OF INDEXABLE INSERT CEMENTED CARBIDGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. RADEK GÁBOR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2007/08

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Gábor Radek, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Aplikace elektroerozivního hloubení při technologii výroby vyměnitelných  
břitových destiček SK.**

v anglickém jazyce:

**The application of electrical discharge sinking at technology of production  
of indexable insert cemented carbide.**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Možnosti elektroerozivního hloubení při technologii výroby vyměnitelných břitových destiček SK.

Cíle diplomové práce:

Elektroerozivní hloubení - rozbor technologických možností metody.

Technologie výroby vyměnitelných břitových destiček.

Aplikace elektroerozivního hloubení.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

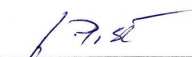
1. KOCMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. Brno : Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie : Advanced methods of material removal. Košice : Viena, 1999. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
3. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L. and RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition New York : Industrial Press Inc., 1996. 2547s. ISBN 0-8311-2595-0.

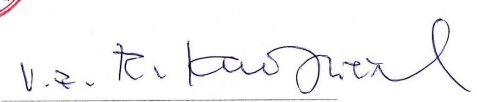
Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 23.11.2007



  
doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

Smlouva, 1. strana

Smlouva, 2. strana

**ABSTRAKT**

Tato diplomová práce nahlíží do problematiky elektroerozivního hloubení. Dále se pak zabývá výrobou vyměnitelných břitových destiček slinutého karbidu a aplikací elektroerozivního hloubení při této technologii.

**Klíčová slova**

Elektroerozivní hloubení, dielektrikum, vyměnitelná břitová destička, slinutý karbid, lisovník, lisovnice

**ABSTRACT**

This diploma thesis view to problem electrical discharge sinking. Forth with deal production of indexable insert cemented carbide and application electrical discharge sinking at this technology.

**Key words**

Electrical discharge sinking, dielectric, indexable insert, cemented carbide, punch, matrix

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

GÁBOR, R. *Aplikace elektroerozivního hloubení při technologii výroby vyměnitelných břitových destiček SK..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Aplikace elektroerozivního hloubení při technologii výroby vyměnitelných břitových destiček SK* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23. 5. 2008

.....

Radek Gábor

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.



## OBSAH

Abstrakt.....	4
Bibliografická citace .....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah .....	7
Úvod .....	8
1 Elektroerozivní obrábění .....	9
1.1 Princip elektroeroze .....	9
1.2 Teoretická podstata elektroerozivního hloubení .....	10
1.3 Pracovní podmínky a charakteristika výbojů .....	15
1.4 Zdroje elektrické energie (GENERÁTORY).....	19
1.4.1 Závislé generátory ( RC a RLC) .....	19
1.4.2 Nezávislé (pulsní) generátory.....	19
1.5 Nástrojové elektrody.....	20
1.5.1 Problematika elektrod.....	21
1.5.2 Používané materiály elektrod.....	21
1.5.3 Určení rozměru nástrojové elektrody .....	22
1.5.4 Vychylování elektrod.....	24
1.5.5 Přednosti planetového obrábění:.....	26
1.6 Kapalné pracovní prostředí (dielektrikum) .....	28
1.6.1 Práškové přísady v dielektriku .....	29
1.7 Vliv vstupních faktorů .....	30
1.7.1 Materiál a polarita elektrod a jejich vliv na obrobiteľnosť kovu.....	33
1.7.2 Vliv dielektrika a stav pracovního prostředí .....	36
2 Výroba vyměnitelných břitových destiček SK .....	39
2.1 Příprava směsi karbidů a pojiva .....	40
2.2 Formování směsi.....	41
2.3 Izostatické lisování za studena .....	42
2.4 Slinování.....	44
3 Aplikace elektroerozivního hloubení .....	47
3.1 Základní technické parametry EDM na hloubení:.....	49
3.2 Volba nástrojové elektrody .....	49
3.2.1 Obrábění Cu-W elektrod .....	51
3.3 Volba dielektrika .....	52
4 Technickoekonomické zhodnocení.....	54
4.1 Celkové náklady na EDM hloubení jedné součásti .....	55
Závěr.....	57
Seznam použitých zdrojů .....	60
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	62

## ÚVOD

Cílem této práce je komplexní náhled do problematiky elektroerozivního hloubení při technologii výroby vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu.

Elektroerozivní hloubení se uplatňuje při vytváření tvarově složitých vnějších, ale zejména vnitřních ploch ve výrobě tvářecích zápustek, forem pro lití, lisovacích nástrojů, forem pro vstřikování plastů atd.

Rostoucí nároky na konstrukci a tvarovou složitost tvářecích nástrojů vedou ke zvyšování podílu těžkoobrobitelných materiálů (žáruvzdorné, žárupevné, vysokopevnostní materiály), které nelze standardními metodami hospodárně obrábět. U těchto materiálů je často jediný možný způsob progresivní výroby uplatnění nekonvenčních metod obrábění. Tyto metody totiž nemají obrobitelnost materiálu limitovanou mechanickými vlastnostmi (například tvrdost nebo pevnost), ale je vázána především na fyzikální vlastnosti, jako tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost a jiné.

Při procesu elektroerozivního hloubení se uplatňuje celá řada vstupních faktorů mající rozhodující vliv na výslednou kvalitu obrobené plochy či tvarovou a rozměrovou přesnost obrobku. Kromě již zmíněných fyzikálních vlastností obráběného materiálu se jedná například o výběr materiálu nástrojové elektrody, čistota dielektrika, charakteristické veličiny chodu stroje jako vybíjecí proud, napětí, časový průběh těchto veličin, nebo vhodně zvolené pořadí technologických operací.

Vstupní faktory procesu a na nich závislé parametry obrobitelnosti jsou důležité ve fázích obrábění, jakož i vztahy mezi nimi. Účelem této práce je pouze pokus o celkové shrnutí problematiky elektroerozivního hloubení při výrobě vyměnitelné břitové destičky s cílem objasnit veškeré charakteristiky této perspektivní a mnohdy nenahraditelné technologie strojírenské výroby.

## 1 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění patří rovněž mezi NMO využívající elektrotepelných principů úběru materiálu a je nejrozšířenější nekonvenční metodou obrábění. Pro jeho označení se v mezinárodní literatuře vžila zkratka EDM (ELEKTRO DISCHARGE MASCHINING).

### 1.1 Princip elektroeroze

Za vhodných podmínek při opakovaných výbojích mezi dvěma elektrodami ponořenými v kapalném dielektriku je eroze (odebírání materiálu) na jedné z elektrod mnohonásobně intenzivnější než na druhé. Elektrické výboje vznikají jen v těch místech kde jsou elektrody vzdálené méně než je průrazná vzdálenost dielektrika a tím dochází postupně k vytváření negativního tvaru nástrojové elektrody do protilehlé elektrody (obráběného materiálu) při malé erozi materiálu nástrojové elektrody. Vhodný mechanismus (zpětná vazba) udržuje elektrody v optimální vzdálenosti.

Rozhodující podmínkou úspěšnosti elektroerozivního obrábění je dosažení maximálního úbytku nástrojové elektrody. Poměr úbytku materiálu nástroje a obrobku vyjadřujeme tzv. relativním objemovým úbytkem v procentech (1):

$$\frac{\text{Objemový úbytek nástroje}}{\text{Objemový úbytek obrobku}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Úbytek nástrojové elektrody je možno ovlivnit volbou následujících podmínek obrábění:

- konstrukcí generátoru, tj. jeho elektrickými parametry charakterizujícími výboje a jejich četnost, polaritou zapojení obou elektrod apod.
- volbou materiálu nástroje v závislosti na materiálu obrobku
- pracovním prostředím – dielektrikem

Při výboji mezi elektrodami na počátku převládá elektronová vodivost a později vzrůstá vodivost iontová. Nejprve se uvolňuje větší část energie v oblasti anody (+) a později v oblasti katody (-) při úměrném zmenšení uvolněné energie v oblasti anody. Proto je vhodné při krátkých výbojových impulsích zapojit obrobek jako anodu (+) a při dlouhých výbojových impulsích jako katodu (-). (1,7)

## 1.2 Teoretická podstata elektroerozivního hloubení

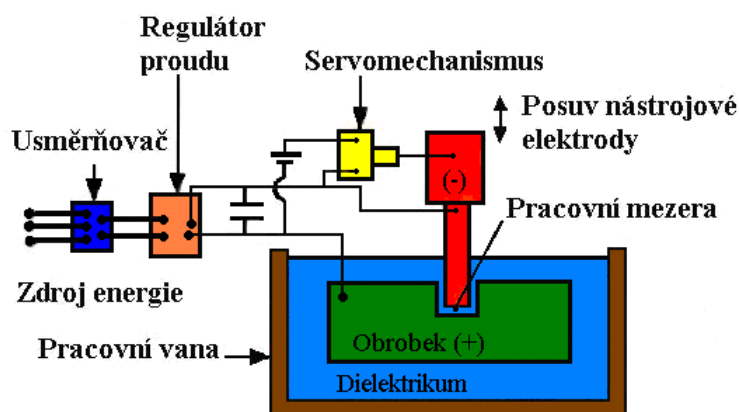
Základem tohoto elektro-tepelného způsobu úběru materiálu je fyzikální jev obecně označovaný jako elektroeroze. Tento jev vznikne, jestliže při elektrickém výboji v plynu vzniknou na vodivých plochách krátery.

Za autory prvního technologického využití jsou všeobecně uznáváni ruští výzkumníci, manželé Lazarenkovi, kteří v 30. letech 20. století prováděli intenzivní výzkum elektrických výbojů pro obrábění kovů. Na základě svých poznatků definovali tyto hlavní zákonitosti elektroeroze:

- všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektrické erozi,
- tyto materiály podléhají elektrické erozi jak v plynném tak v kapalném prostředí (dielektriku),
- vhodným zapojením a volbou parametrů obvodu lze docílit přeměnu stacionárního výboje (oblouku) na opakované nestacionární výboje umožňující podstatně přesnější rozrušování materiálu. (1)

Fyzikální pochod úběru materiálu elektrickým výbojem je velmi komplexní jev. Obr. 1.1 ukazuje, že obrábění probíhá na dvou elektrodách při ponoření do pracovního média. Tímto pracovním médiem je dielektrikum, tj. kapalina s vysokým elektrickým odporem. Vznik výboje mezi elektrodami je vyvolán přivedením napětí na vodivé elektrody. Výše tohoto napětí závisí především na následujících faktorech:

- vzdálenost mezi elektrodami,
- vodivost dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika.



Obr. 1.1 Základní schéma elektroerozivního hloubení (4)

Ke vzniku výboje dochází v místě nejsilnějšího elektrického napěťového pole. Vlivem působení tohoto pole se uvádějí do pohybu volné záporné a kladné ionty, zrychlují se a nabývají vysoké rychlosti. To vede ke vzniku ionizovaného (vodivého) kanálu. V tomto stavu začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a mezi elektrodami vzniká výboj, jenž vyvolává řadu dalších srážek částic. Vzniká plazmové pásmo, které dosahuje velmi vysokých teplot (podle typu výboje 3000 – 12000 °C). To způsobuje tavení a odpařování určitého množství materiálu na obou elektrodách.

Současně vzniká odpařováním dielektrika plynová bublina, jejíž tlak dosahuje vysoké hodnoty. V okamžiku přerušení proudu vyvolá pokles teploty implozi této bubliny. Do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. V důsledku chladícího účinku dielektrika tento materiál tuhne a je odváděn ve formě drobných kuliček.

Časový průběh výboje lze rozčlenit do devíti následujících fází. Viz obr.1.2 (4):

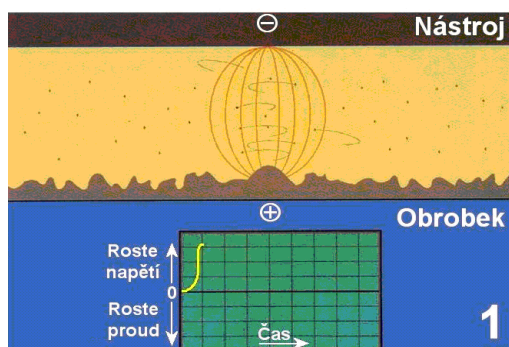
**Fáze 1.** V okamžiku přiložení napětí na obě elektrody se začne vytvářet elektrické pole. V důsledku nerovnosti elektrod se v místě nejmenší vzdálenosti vytváří místo maximálního gradientu. Elektricky vodivé částice (znečištění) jsou vtahovány do tohoto místa. Napětí roste, proud je nulový. Viz obr. 1.2a.

**Fáze 2.** Elektricky vodivé částice vytváří můstky, které jsou základem pro zapálení výboje. Izolační vlastnosti kapaliny klesají. Přiložené napětí dosahuje maximální hodnoty, proud zůstává nulový. Viz obr. 1.2b.

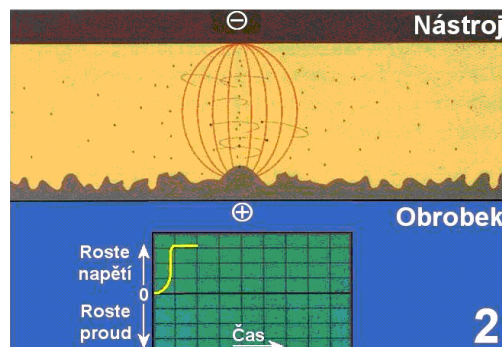
**Fáze 3.** Působením elektrického pole se začínají ze záporně nabité elektrody uvolňovat elektrony. Tyto se srážejí v prostoru s neutrálními částicemi a tříští se. Tak vznikají v kanále kladné a záporné ionty. Tento proces nazýváme ionizací prostředí. Kapalina se pomalu přestává chovat jako izolátor. Mezi elektrodami začíná pomalu protékat proud, napětí začíná klesat. Viz obr. 1.2c.

**Fáze 4.** Ionty obalují střed budoucího výbojového kanálu a klesá odpor výbojového kanálu. Mezelektrodovým prostorem začíná protékat proud, roste proudová hustota ( $\sim 10^6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ ) a začíná se vytvářet vodivý kanál z plazmy. Roste teplota na povrchu elektrod a začínají se odpařovat částičky elektrod a kapaliny. Klesá napětí na elektrodách. Viz obr. 1.2d.

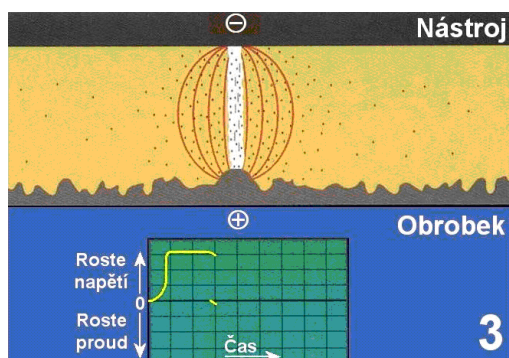
**Fáze 5.** Začíná odpařování dielektrika a vzniká plynová bublina. Ta chce expandovat, ale ionty přitahované silným elektromagnetickým polem k jiskrovému kanálu tomu brání. V důsledku nárazu částic dochází k uvolňování vysokého množství tepelné energie. Nárazy elektronů na anodu a iontů na katodu způsobují ohřev ohraničených míst obou elektrod, jejich tavení a odpařování. Protékající proud dosahuje maximální hodnoty a napětí se ustavuje na takzvané zápalné hodnotě výboje. Viz obr. 1.2e.



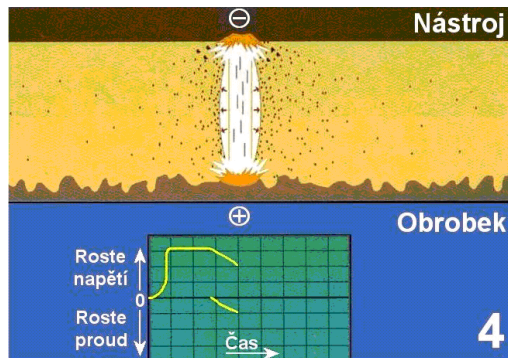
Obr. 1.2a.



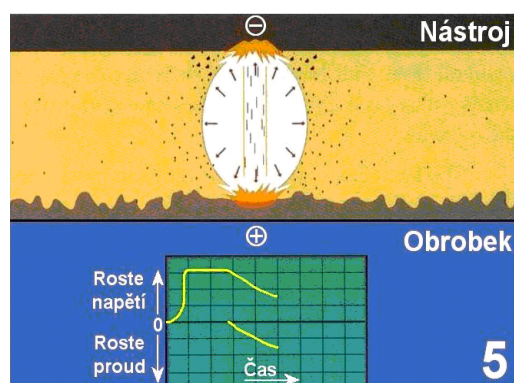
Obr. 1.2b.



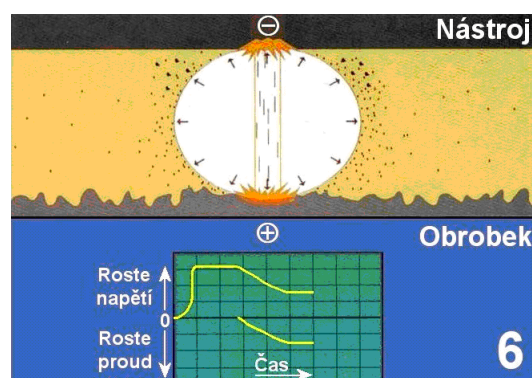
Obr. 1.2c.



Obr. 1.2d.



Obr. 1.2e.



Obr. 1.2f.

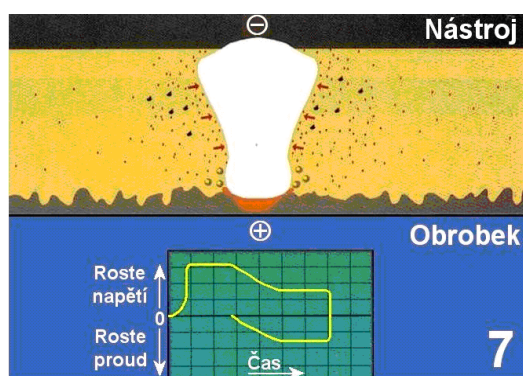
**Fáze 6.** Bublina dosahuje maximální hodnoty tlaku a teploty. Jiskrový kanál obsahuje plazmu a dochází k intenzivnímu natavení a vypařování materiálu, který je tlakem bubliny zadržován. Proud i napětí jsou stabilizovány. Viz obr. 1.2f.

**Fáze 7.** Napětí a proud klesá na nulu. Přerušeni přiváděné energie a pokles proudu v mezielektrodové mezeře vyvolá snížení dodávky tepla. Pokles teploty je příčinou začátku imploze plynové bubliny. Síly elektrického pole a pokles tlaku plynů způsobují rozrušení materiálu vytrháváním taveniny do prostoru – vznik kráteru. Viz obr. 1.2g.

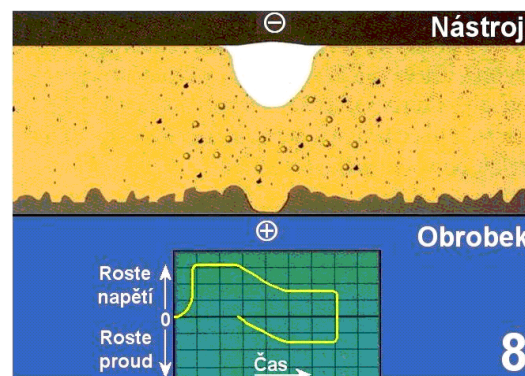
**Fáze 8.** Pracovní proud a napětí v mezielektrodové mezeře je na nulové hodnotě. Dochází k úplnému zániku bubliny výboje. Do vzniklého kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla do hlubších vrstev kovu. Odebraný materiál zůstává v dielektriku ve formě spalin a mikročástic vzniklých z taveniny kovu. Viz obr. 1.2h.

**Fáze 9.** Stav eroze před začátkem nového výboje. Dielektrikum je znečištěno produkty eroze a obsahuje zbývající volné ionty, které vytváří základ tvorby nového výbojového kanálu. Viz obr. 1.2i.





Obr. 1.2g.



Obr. 1.2h.



Obr. 1.2i.

Cílem elektroerozivního obrábění je dosáhnout opakovanými výboji na jedné elektrodě – obrobku - maximálního úběru materiálu a na druhé elektrodě – nástroji - naopak co nejmenšího úbytku materiálu, a tím i minimálního opotřebení nástroje. Z tohoto hlediska je nutné vycházet při realizaci elektroerozivního obrábění a volit tak vhodné podmínky obrábění. Tyto jsou především dány následujícími údaji:

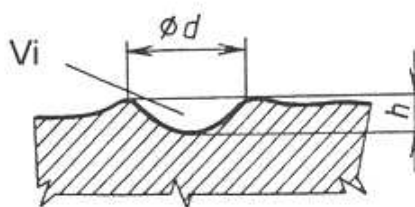
- Vhodným způsobem dodávání energie, tj. zapojením obvodu, jeho polaritou elektrickými parametry charakterizujícími jednotlivé výboje a jejich četnost
- Volbou správného materiálu nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu
- Vhodným pracovním prostředím (dielektrikem) a jeho čistotou (4)



### 1.3 Pracovní podmínky a charakteristika výbojů

Velikost a tvar kráteru vytvořeného elektrickým výbojem jsou dány velikostí vybíjecí energie. Zvětšený profil vzniklého kráteru je uveden na obr. 1.3, přičemž jeho rozměry závisí na hodnotě přivedené energie a době výboje, a mají podstatný význam pro drsnost opracované plochy, přesnost rozměrů a účinnost procesu. Množství odebraného materiálu je úměrné vybíjecí energii a lze jej vypočítat z rovnice 1.2. (1)

$$V_i = K \cdot W_i \quad (1.2)$$

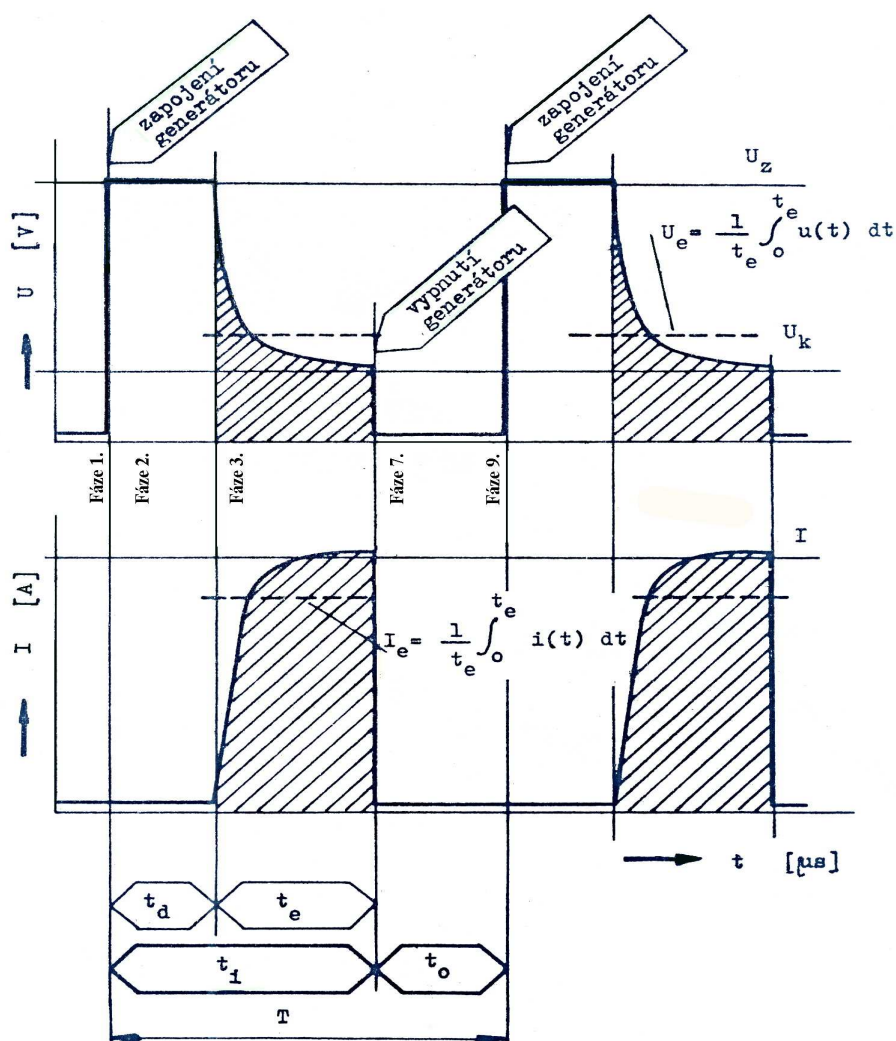


Obr. 1.3 Profil kráteru (1)

V rovnici 1.2 vyjadřuje  $W_i$  [J] energii výboje a  $K$  součinitele, který bude mít různé hodnoty jak pro katodu, tak i anodu. Časový průběh výboje je obvykle určován řadou charakteristik, které jsou zobrazeny na obr. 1.4. K základním fyzikálním charakteristikám patří:

- doba impulsu  $t_i$ : Časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru.
- doba pauzy  $t_0$ : Časový úsek mezi vypojením a novým zapojením generátoru.
- doba zpoždění výboje  $t_d$ : Čas mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika.
- doba výboje  $t_e$ : Časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru, tj. skutečně činná doba výboje.
- doba periody  $T$ : Časový úsek určující frekvenci výbojů.
- napětí na prázdno  $U_z$ : Napětí při zapnutí generátoru (zápalné napětí výboje).
- maximální pracovní proud výboje  $I$ : Maximální vybíjecí proud protékající mezi elektrodami v okamžiku výboje.

- střední vybíjecí proud  $I_e$ : Střední hodnota proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru.
- střední vybíjecí napětí  $U_e$ : Střední hodnota napětí mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru. Tato hodnota nepatří mezi volitelné veličiny. Je závislá na ostatních pracovních podmínkách jako obráběný materiál nebo stav dielektrika.
- napětí  $U_K$ : Hodnota napětí při zhasnutí výboje.



Obr. 1.4 Časový průběh výboje (1)

Uvedené veličiny umožňují určit celkové množství odebraného materiálu. Pro energii jednotlivého výboje obecně platí rovnice 1.3. (1)

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.3)$$

Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času je dáno součtem úbytků na obou elektrodách bez ohledu na polaritu. V závislosti na energii jednotlivých výbojů a jejich frekvenci platí rovnice 1.4 . (1)

$$Q_v = K \cdot f \cdot \eta \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.4)$$

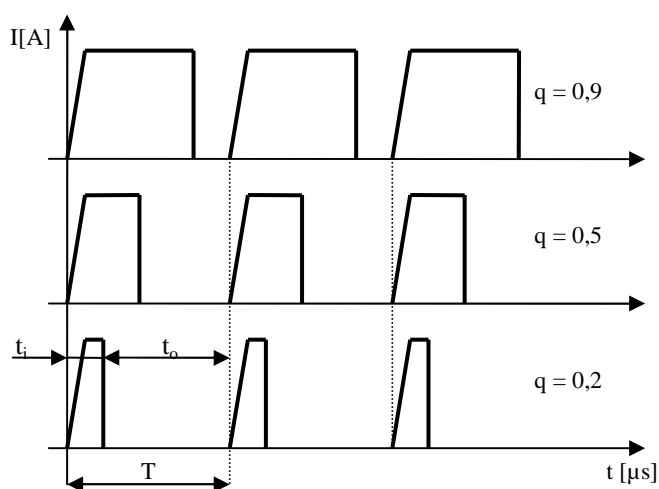
Kde:  $f$  ..... frekvence výbojů [ $s^{-1}$ ],

$\eta$  ..... účinnost elektrického výboje [-],

$K$  .... součinitel úměrnosti pro katodu a anodu.

Z rov. 1.4 vyplývá, že množství odebraného kovu za jednotku času, tedy rychlost úběru materiálu, je úměrné frekvenci výbojů, napětí, proudu a době trvání výboje.

S ohledem na značný význam časového průběhu výboje, na intenzitu úběru materiálu a kvalitu obrobené plochy a na možnost systematického rozdělení výbojů, je vhodné zavést veličinu tzv. časového využití periody výboje –  $q$ . Tato veličina umožňuje číselnou hodnotou charakterizovat formu výboje. Viz. obr. 1.5 a rov.1.5. (1)



Obr. 1.5 Časové využití periody výboje (1)

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (1.5)$$

Podle takto charakterizovaného časového průběhu dodávané energie do místa výboje rozdělujeme elektrické výboje na dva základní typy :

1. Výboj elektrickou jiskrou, který je charakterizován krátkou dobou impulzu  $t_i = 10^{-4} \div 10^{-6}$  s , při malých hodnotách časového využití periody výboje, dosahujících hodnot  $q = 0,03 \div 0,20$  a při vesměs značně vysokých frekvencích výbojů. Ve výbojovém kanále převládá elektronová vodivost, vyvolávající vyšší úbytek anody proti katodě, která elektrony uvolňuje. V místě výboje je dosahováno velmi vysoké hustoty proudu ( $\sim 10^6$  A·mm<sup>-2</sup>). Uvedeným hodnotám odpovídá vysoká koncentrace energie ( $10^5 \div 10^7$  W·mm<sup>-2</sup>) a tvorba teploty ve výbojovém kanále dosahující hodnot až 10000 °C. S ohledem na nižší energie jednotlivých výbojů asi  $W_i = 10^{-5} \div 10^{-1}$  J a dle rov. 1.3, jsou takto generované výboje používány v převážné míře pro obrábění menšími úběry, tedy k dokončování.

2. Výboj nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem je charakterizován delší dobou impulzu  $t_i > 10^{-4}$  s , při vyšších hodnotách časového využití periody výboje  $q = 0,2 \div 1,0$  a obecně nižších frekvencích výbojů. Ve výbojovém kanálu převládá iontová vodivost. Uvolňuje se větší množství kladných částic, vyvolávající svými dopady na katodu větší tepelný účinek a tím i úběr této elektrody. Ve výbojovém kanálu dosahuje proudová hustota  $10^2 \div 10^3$  A·mm<sup>-2</sup> při teplotě 3300 ÷ 4000 °C. Vyšší hodnoty energie jednotlivých výbojů předurčují tento typ výbojů pro hrubovací operace.

Elektrojiskrové obrábění, které využívá obloukový výboj vhodného tvaru a časového průběhu, se označuje jako elektroimpulzní obrábění. Zdrojem pracovního proudu je impulzní generátor, nástrojová elektroda je napojena na pól plus (+), obrobek na pól mínus (-). Pro tento účel se používají zvlášť zkonstruované nezávislé impulzní generátory, u kterých amplituda, doba trvání, polarita, frekvence a tvar impulzů nezávisí na době obrábění, ani na fyzikálním stavu jiskrové mezery. V porovnání s běžným elektrojiskrovým obráběním lze u tohoto způsobu dosáhnout podstatně vyšších úběrů materiálu (až 25 cm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>),

avšak drsnost povrchu a přesnost rozměrů obrobené plochy jsou horší. Za výhodu lze též považovat menší opotřebení nástrojové elektrody. (1)

## **1.4 Zdroje elektrické energie (GENERÁTORY)**

### **1.4.1 Závislé generátory ( RC a RLC)**

Tyto tzv. ELEKTROJISKROVÉ (relaxační) generátory patří k nejstarším zdrojům výbojů. Činnost generátoru spočívá v opakujícím se nabíjení kondenzátoru přes odpor ze zdroje stejnosměrného proudu a jeho vybíjení v pracovní mezeře, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Velikost průrazného napětí je závislá i na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Frekvence a energie jednotlivých výbojů je závislá na změně poměrů v jiskřišti a proto tyto generátory nazýváme ZÁVISLÉ.

Závislé generátory dávají velmi krátké výboje, ve kterých převládá elektronová vodivost. Je proto vhodné zapojovat obrobek jako anodu a nástroj jako katodu (menší úbytek). Generátory jsou jednoduché a spolehlivé. K nevýhodám patří vysoký relativní objemový úbytek nástroje (30 % i více) způsobený vznikem střídavého proudu se zápornou půlvlnou, omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů a nízká produktivita obrábění. Zapojení indukčnosti (L) do nabíjecího obvodu (zapojení RLC) prodlužuje délku trvání výboje a omezuje intenzitu vybíjecího proudu. (1,9)

### **1.4.2 Nezávislé (pulsní) generátory**

Nezávislé generátory umožňují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. V podstatě existují dva typy nezávislých generátorů :

- ROTAČNÍ – impulsy vznikají roztáčením dynama asynchronním motorem. Obvykle mají stálou frekvenci, např. 400 Hz a umožňují vysokou úbělovost. K nevýhodám patří vysoká hlučnost a obtížná regulace frekvence pulsů.
- POLOVODIČOVÉ – nezávislé generátory umožňují širokou nastavitelnost Elektrických parametrů. Frekvenci je možno měnit

např. v rozsahu 0,5-50 kHz . Při výbojích nevzniká negativní půlvlna a je dosahován malý relativní objemový úbytek nástroje cca 1%. Charakteristická je delší doba trvání impulsů s převahou iontové vodivosti a proto se obrobek zapojuje většinou jako katoda.

Moderní elektroerozivní stroje již převážně používají polovodičové (impulsní) generátory, které jsou automaticky (adaptivně) řízeny CNC řídicími systémy dle zadaných technologických pracovních parametrů. (1,9)

### 1.5 Nástrojové elektrody

Hodnoty relativního objemového úbytku závisí především na volbě materiálu nástroje ve vztahu materiálu k obrobku, na polaritě, velikosti pracovního proudu a době trvání impulsu. Velikost opotřebení elektrod obsahuje v praxi hodnot od desetin procenta až do desítek procent. Při dokončovacím obrábění bývá opotřebení nástroje zpravidla vyšší.

Všechny údaje, potřebné pro volbu pracovních podmínek elektroeroze (doporučená polarita, nastavitelné parametry generátoru, materiál elektrody ve vztahu k obráběnému materiálu, velikost úběru, opotřebení nástroje, dosažitelná drsnost obrobené plochy, údaje pro volbu rozměrů nástroje apod.) bývají uvedeny v podkladech k jednotlivým obráběcím strojům.

Pro výrobu elektrod se jako materiál používá elektrolytická měď, grafit, wolframová měď (slitina 50-80% Cu), mosaz, slitiny Al-Wolfram a ocel. V zahraničí se značně rozšířilo používání elektrod z grafitu, který je velmi dobře obrobitelný. Nevýhodami jsou prašnost, nutnost dovozu polotovarů do ČR.

Kovové nástroje elektrody se vyrábějí následujícími způsoby:

- třískovým obráběním
- zápusťkovým kováním nebo lisováním
- litím
- práškovou metalurgií
- galvanoplastikou
- stříkáním kovu

### 1.5.1 Problematika elektrod

Správný výběr materiálu elektrod má zásadní vliv na průběh procesu a tudíž i na jeho výsledek. Základní charakteristika metody EDM hloubení je, že elektroda negativního tvaru z kopíruje pomocí výbojů tento tvar do obrobku. Z toho důvodu je jasné, že přesnost tvaru elektrody je velmi důležitá i pro konečnou geometrickou přesnost dutiny. Značný rozvoj technologie elektrojiskrového hloubení zejména co se týče CNC řízení umožnil snižování potřeby tvarově složitých elektrod. Není to však pravidlo, že jakýkoliv tvar je možno vyhloubit větším počtem tvarově jednoduchých elektrod. Nároky na tvarovou složitost zejména plastových forem, které si vyžaduje např. spotřební či automobilový průmysl, stále rostou. Tím rostou nároky na různorodost tvaru elektrod a tedy i na jejich výrobu, která je úzce vázána na technologii EDM hloubení. (9)

### 1.5.2 Používané materiály elektrod

Jelikož ve skladbě nákladů na výrobu dutiny elektroerozivním hloubením může částka příslušející na materiál a výrobu elektrody tvořit nezanedbatelný díl, je nutno věnovat volbě materiálu elektrod prvořadou pozornost. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při vlastní práci nedeformoval. Mezi nejrozšířenější materiály elektrod patří:

- **elektrolytická měď (Cu)** – Má dobrou elektrickou vodivost, vykazuje nízké opotřebení měděné elektrody nepracují tak dobře jako grafitové či Cu-W.
- **grafit (C)** – Nejvíce rozšířený materiál a jeho podíl ve výrobě stále stoupá, má vhodné charakteristiky pro hrubování i dokončování, je snadno obrobitelný.
- **měď – wolfram (Cu-W); stříbro – wolfram (Ag-W)** – Měděná složka umožňuje vysokou tepelnou vodivost, zatímco její wolframová složka zvyšuje odolnost proti jiskrové erozi. Na trhu jsou nabízeny ve složeních měď-wolfram 20%-80%; 25%-75%; 30%-70%, tyto materiály mají nejlepší vlastnosti pro EDM hloubení jejich cena je však v porovnání s mědí 20 ÷ 100krát vyšší, tyto materiály jsou vyráběny slinováním wolframu s mědí nebo stříbrem.

- **měď – grafit** – Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit.

- **mosaz** – Je to dobře obrobitelný materiál, má dobré vlastnosti avšak jeho opotřebení je mnohem vyšší než u mědi.

- **wolfram** – Používá se pro speciální účely hloubení velmi malých otvorů s průměrem do 0,2 mm. (1,9)

### 1.5.3 Určení rozměru nástrojové elektrody

V případech hloubení dutin určuje rozměr elektrody přesnost obrobené plochy. Problematika určení rozměru elektrody je uvedena na příkladu válcového otvoru dvojící elektrod (hrubovací a dokončovací), viz obr 1.6. Rozměr elektrody je určen:

- požadovaným průměrem dutiny (D),
- velikostí pracovní mezery (GAP),
- parametrem vlivu tvaru ( $R_y$ ),
- tloušťkou narušeného povrchu (z).

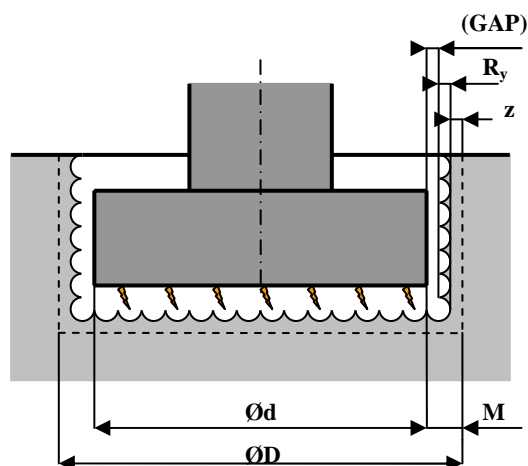
#### ***Určení rozměru hrubovací elektrody***

Pro výpočet rozměru hrubovací elektrody platí rovnice 4.1 (1):

$$d = D - 2 \cdot (GAP + R_y + z) = d - 2 \cdot M \quad (4.1)$$

kde M je minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného  $\varnothing$  D. Hodnota pracovní mezery GAP je dána především pracovními parametry





Obr. 1.6 Určení rozměru hrubovací elektrody (1)

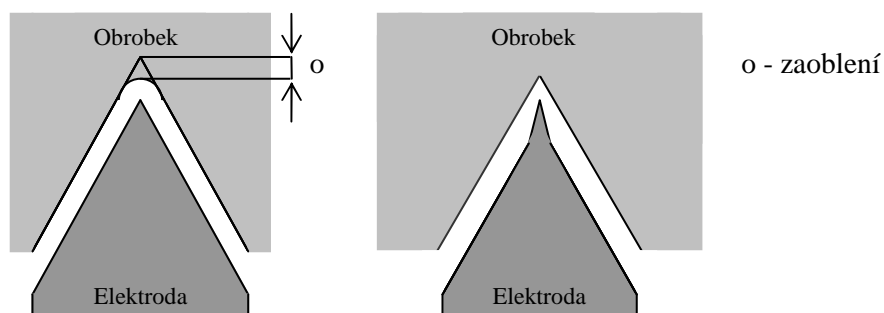
generátoru. Tyto pracovní parametry určují i hodnotu  $R_y$ . Tato hodnota současně zahrnuje i tvarové chyby vzniklé při hrubování. Zdrojem tvarových chyb jsou nežádoucí boční výboje, které vznikají v důsledku opotřebení elektrody a vodivých částic (produktů eroze). Vodivé částice jsou zdrojem bočních výbojů, čímž dochází k vytvoření zkoseného otvoru. Uvedený jev lze omezit úpravou tvaru elektrody a použitím výplachu s odsáváním. Přídavek ( $z$ ) zahrnující tloušťku narušené vrstvy má význam pouze při velkých energiích výbojů a v těchto případech je nutné uvedenou hodnotu odebrat dokončovací elektrodou.

### **Určení rozměru dokončovací elektrody**

Jelikož pro oblast dokončování se volí výboje s nižší energií jednotlivých impulzů, je jasné, že vzniklá hodnota  $R_y$  bude zanedbatelná ve vztahu k hodnotě GAP. Rozměr dokončovací elektrody je v těchto případech obvykle dán pouze hodnotou GAP. Tedy platí rovnice 4.2 (1).

$$d = D - 2 \cdot GAP \quad (4.2)$$

V oblasti hloubení profilových otvorů s ostrými hranami není vždy možné získat žádaný profil otvoru. Z toho důvodu je v uvedeném případě provedena korekce tvaru nástrojové elektrody. Příklad možného řešení je na obr. 1.7.



a) neupravená elektroda

b) upravená elektroda

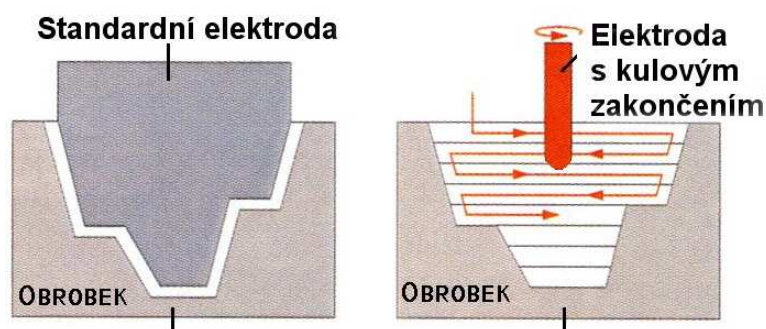
Obr. 1.7 Schéma korekce tvaru nástrojové elektrody (1)

### 1.5.4 Vychylování elektrod

Zavedení CNC řízení umožnilo adaptivní obrábění řízené až v 6-ti osách současně a spolu s měniči nástrojů vedlo k rozdělení nástrojové elektrody na větší počet elektrod jednoduchého tvaru. Složitější tvary lze totiž na strojích s CNC řízením hloubit i jednoduchou elektrodou, jejíž pohyb je řízen po odpovídající dráze.

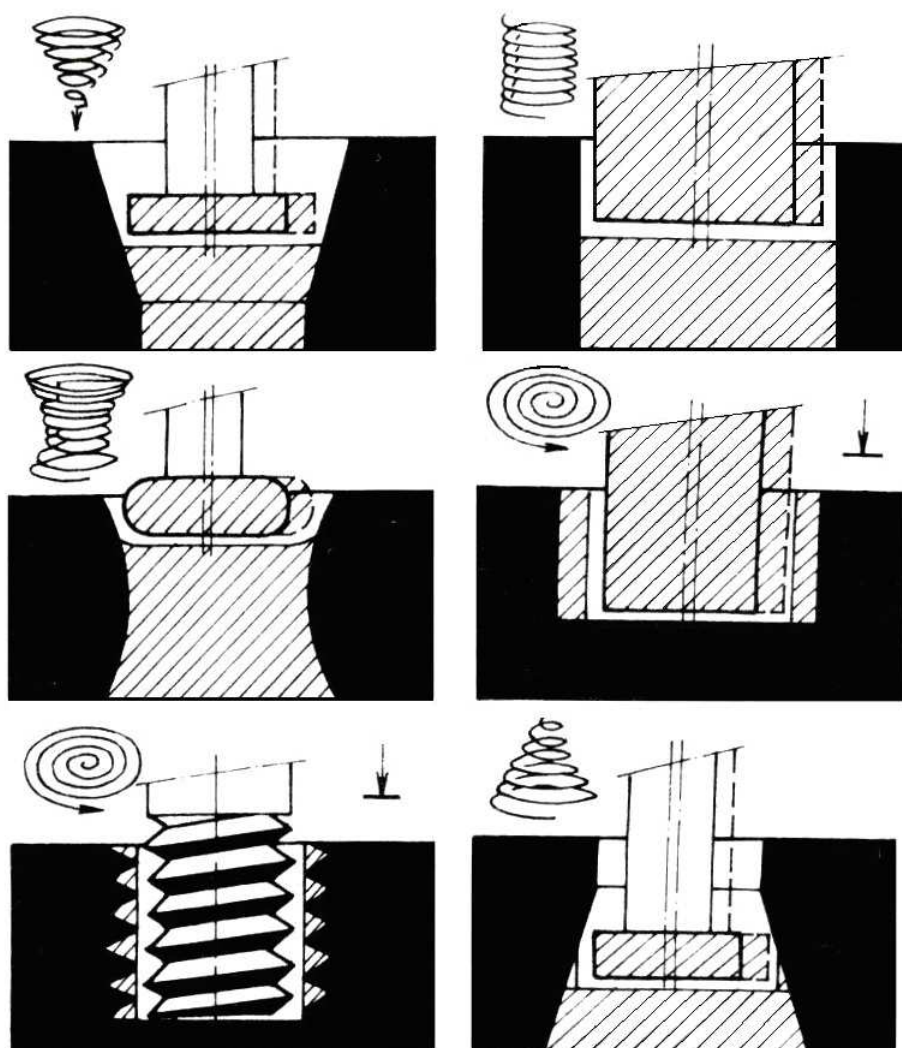
Funkce vychylování elektrod spočívá v řízeném pohybu elektrody ve všech směrech. Tento pohyb, buď translační nebo orbitální, umožňuje podstatně jednoduššími elektrodami zhotovovat složité tvary. Zejména se zmenšuje opotřebení elektrod, neboť úbytek elektrody při vhodném pracovním režimu lze korigovat velikostí výchylky translace.

Válcovými elektrodami je též možné zcela jednoduše vyjiskřit otvory kuželové s kuželem negativním i pozitivním. Při hloubení otvorů a dutin s ostrými vnitřními rohy vznikají vlivem všesměrové translace v rozích zaoblení, jejichž poloměr se rovná velikosti výchylky translace a šířky pracovní mezery. Pro dokončení rohů není třeba zhotovovat novou elektrodu, ale zvětšením výchylky podle propočtu a nastavením krokování elektrody do potřebného směru je dokončení těchto rohů snadno a rychle realizovatelné. Viz. obr. 1.8.



Obr. 1.8 Schéma zjednodušení elektrody (4)

Použitím translace se dosáhne též i zlepšení kvality povrchu. Jedno- nebo více směrovým pohybem vícesměnovým pohybem elektrody se dosahuje toho, že elektroda jiskří střídavě vždy jen jednu plochu (u průřezů vícehranných) a částí plochy u průřezů oblých. Protilehlá strana jiskřící elektrody se pravidelně oddaluje od stěny a dna dutiny a tím se vytváří postupně širší mezera mezi elektrodou a obrobkem, která umožňuje lepší a rychlejší jiskření výplachem. Klasický způsob hloubení je založen na postupném “přenášení” tvaru nástrojové elektrody, která se pohybuje ve směru svislé osy k obráběnému materiálu. Na obr. 1.9 jsou uvedeny základní možnosti obrábění realizovatelné za pomoci vychylování elektrod. Vychylovače elektrod se připevňují na pinolu stroje a jejich funkce spočívá v řízeném vychylování elektrody ve všech směrech roviny X-Y. Výsledný pohyb (translace) elektrody je charakterizován jako orbitální a pro tento způsob hloubení se vžil název PLANETOVÉ OBRÁBĚNÍ. (4,6)



Obr. 1.9 Základní možnosti obrábění realizovatelné za pomoci vychylování elektrod (6)

#### 1.5.5 Přednosti planetového obrábění:

- tvarově jednoduchými elektrodami je možno zhotovit složité tvary
- snižuje se spotřeba elektrod, protože úbytek elektrody při vhodném pracovním režimu lze korigovat velikostí výchylky translace, a to až o  $\pm 2$  mm ve všech směrech. Jedinou nízkou osazenou elektrodou libovolného průřezu je možno zhotovovat průchozí otvory, v otvoru zápich i podkos. Zhotovují se otvory s kuželem negativním i pozitivním, otvory s konkávními nebo konvexními stěnami, závity apod., dosahuje se podstatného zkvalitnění obrobeneho povrchu vzhledem k zlepšenému vyplachování při planetovém pohybu.

Snadněji se odstraňují elektricky vodivé oxeroxované částice, které v prostoru jiskřiště způsobují zhoršení jakosti povrchu přesnosti hloubení

- zkracují se strojní časy o 40-60% při zmenšené spotřebě elektrod.

Dalším významným mezníkem v rozvoji elektroerozivního hloubení bylo zavedení NC řízení EDM hloubících strojů ve čtyřech osách současně, přičemž čtvrtou osou je osa C, která umožňuje otáčení vřetene s elektrodou. Běžně se vyrábějí CNC centra se zásobníky nástrojů (elektrod). Hloubený tvar je postupně obráběn řadou geometricky jednoduchých elektrod. Poloautomatická centra s CNC řízením jsou zařazována do výrobních cyklů pro komplexní zhotovování nástrojů.

Moderní hloubící stroje se vyrábějí zejména následujícími konstrukčními prvky:

- automatickou výměnou nástrojových elektrod ze zásobníků, které obsahují až 100 elektrod
- automatizovanou výměnou obrobků upnutých na paletách. Konstrukce strojů je přizpůsobena základnímu použití EDM hloubení pro převážně kusovou výrobu dutinového nářadí (formy, kovářské zápustky apod.) se širokým rozsahem rozměrů a tvar s vysokými požadavky na přesnost a kvalitu opracování. Všechny pracovní pohyby elektrod vůči obrobku v osách X,Y,Z,C většinou vykonává hlava stroje, do které se upínají elektrody
- součástí center jsou i měřicí místa – měřicí stroje, na kterých se proměřují obrobky a jejich poloha vůči referenčním plochám a tyto informace se předávají řídicím počítačům
- moderní řídicí systémy umožňují operátorům ovládat stroje dialogovým způsobem
- používá se barevná grafika na kontrolu programu a pro znázornění okamžité polohy elektrody a obrobku při polohování nebo při obrábění
- byly vyvinuty speciální generátory nebo přídavná zařízení pro obrábění SK, pro vyjiskřování malých otvorů a pro dosažení kvalitního, případně i lesklého povrchu. Při použití speciálních generátorů se dosahuje drsnosti povrchu Ra-0,2 mikrometrů

- v digramovém vybavení strojů je uložen zásobník technologických informací, ze kterého se na základě vstupních údajů vložených operátorem automaticky volí parametry pro jednotlivé kroky technologického postupu
- EDM zařízení pracují většinou s dielektrickou kapalinou, která se regeneruje v uzavřeném okruhu vlastního stroje ( filtrace, udržování vodivosti, regulace teploty apod.)
- Používají se velmi dokonalé pomůcky na výrobu elektrod, jejich upínání a polohování vůči obrobku, přípravky pro přesné upínání obrobků, měřicí hlavice pro určování polohy vůči obrobku při automatické výměně elektrod.

### 1.6 Kapalně pracovní prostředí (dielektrikum)

Dielektrikum plní řadu funkcí nutných pro stabilní průběh elektroerozivního procesu. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů zabraňuje vylučování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody a tím zabraňuje vzniku zkratů. (9)

#### POŽADAVKY NA DIELEKTRICKÉ KAPALINY:

- dielektrické vlastnosti (odpor) umožňující v znik výboje průrazem dielektrika
- bod vzplanutí dielektrika musí být vyšší než 60`C , protože při výbojích vznikají vysoké teploty které způsobují oteplení elektrod a dielektrika
- hygienická a ekologická nezávislost. Nesmí docházet k rozkladu a vzniku zdraví nebezpečných plynů
- nízká pořizovací cena

Jako dielektrikum se používají kapaliny na bázi petroleje, petrolej, voda a pro EDM drátové řezání neionizovaná voda. Řada světových výrobců vyrábí speciální kapaliny, vyznačující se zejména tím, že neobsahují aromatické složky jako klasické petroleje. Elektroerozivní stroje jsou vybavovány zařízeními pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. EDM drátové řezací stroje jsou vybaveny deionizačními kolonami pro zlepšení dielektrických vlastností vody.

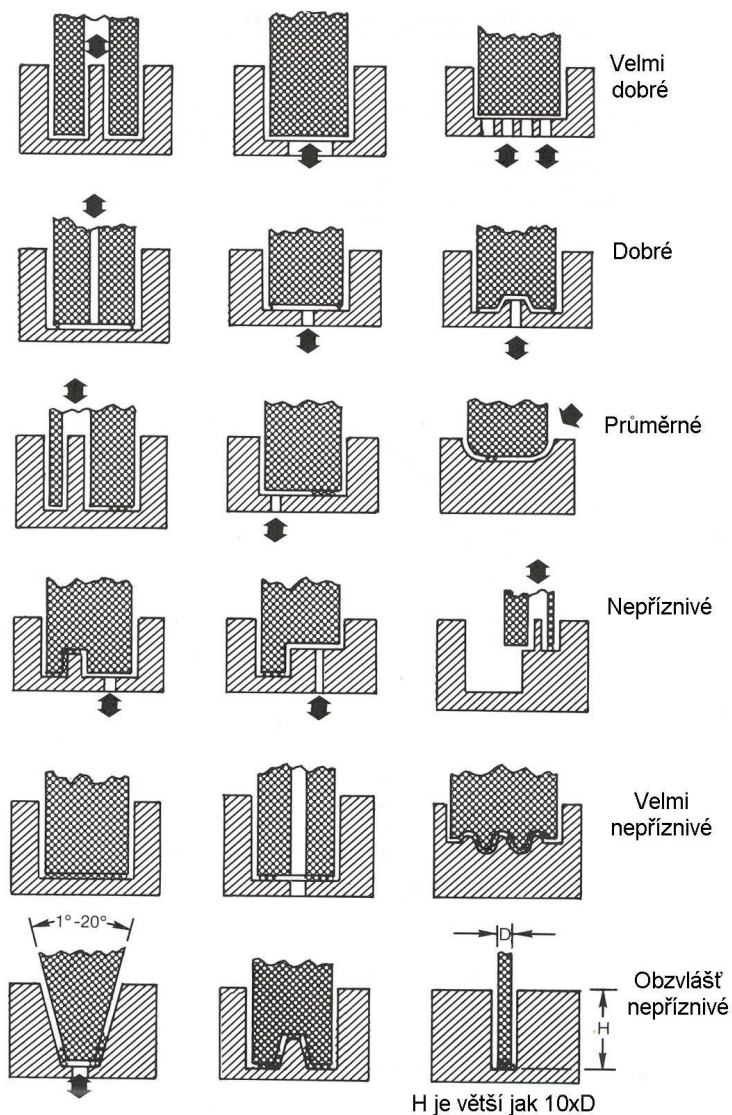
Pro vyplachování mezielektrodového prostoru je používáno několik způsobů:

- vnější vyplachování
- tlakové vyplachování
- vyplachování odsáváním
- pulsní vyplachování .Nástrojová elektroda se v nastavitelných časových intervalech oddaluje od materiálu, případně ještě elektroda může rotovat. Zvedání elektrody bývá kombinováno s přívodem dielektrika a odpojením pracovního proudu

K vyplachování mezielektrodového prostoru a k plynulosti procesu elektroeroze podstatným způsobem napomáhá vibrace nástrojové elektrody, která se vytváří speciálním regulovatelným elektromagnetickým zařízením instalovaným na stroji. (1,9)

#### **1.6.1 Práškové přísady v dielektriku**

V popisu průběhu jednotlivého výboje bylo uvedeno, že dielektrikum na konci výboje obsahuje produkty eroze, které vytváří základ tvorby nového výbojového kanálu. Z toho tedy plyne, že určité procento znečištění je žádáno. Jednou z možností jak ovlivnit vznik a průběh výboje a tím i kvalitu povrchu obrobku je cílené znečištění dielektrika malými částicemi vhodné koncentrace. Takto obohacené dielektrikum může obsahovat částice mědi, grafitu, chrómu či různých karbidů o velikosti od 70 nm až po 100 $\mu$ m. Přísada vytváří homogenní podmínky pro jiskrovou mezeru, což umožňuje dosažení zrcadlového lesku a zkrácení doby výroby povrchu. To společně s eliminací potřeby závěrečného leštění umožňuje dosáhnout až 50% úspory výrobních časů. Např. vysoké jakosti povrchu je dosaženo pomocí nové technologie GammaTEC švýcarské firmy Charmilles, založené na aplikaci speciálního aditiva GammaMIX 50, obsahujícího jemné částičky grafitu, které se přidává do dielektrické lázně. Technologie GammaTEC vyžaduje speciální nádrž s cirkulací dielektrika bez použití filtrace. Pro separaci odebraného materiálu z dielektrika se užívají magnety. Prášek je pak čerpadlem navrácen zpět do tanku. (7)



Obr. 1.10 Klasifikace způsobů proudění dielektrické kapaliny (7)

## 1.7 Vliv vstupních faktorů

Elektrojiskrové hloubení, jako hlavní představitel elektroerozivních metod, často označovaný jako EDM (Electro Discharge Machining) proces, je využíváno k odstranění kovu během účinku elektrického výboje krátkého trvání a vysoké hustoty proudu mezi nástrojem a obrobkem. EDM se užívá zvláště pro obrábění žárovzdorných, žárovevných, vysokopevnostních materiálů, které jsou těžko zpracovatelné konvenčními metodami obrábění. Technologie EDM nemají obrobiteľnosť materiálu limitovanu mechanickými vlastnosťmi. Nejsou



zde totiž přítomny žádné mechanické řezné síly mezi nástrojem a obrobkem, ale obrobitelnost je vázána především na fyzikální vlastnosti, jako tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost a jiné. EDM hloubení se ve značném rozsahu používá ve výrobě vstřikovacích forem, kovacíh záпустek, lisovacích forem apod., k zhotovení dutin téměř jakéhokoliv tvaru. Metodou EDM lze obrábět relativně jednoduše složité tvary, které by byly konvenčními řeznými nástroji velice obtížně vyrobitelné, či by jejich výroba nebyla vůbec možná.

Při procesu EDM hloubení se uplatňuje řada činitelů ovlivňujících kvantitativní či kvalitativní hodnocení výsledků obrábění. Jako u všech technologických operací strojírenské výroby, je i v EDM hloubení důležité dosáhnout co nejpřesnějšího požadovaného tvaru, při co nejlepší kvalitě povrchu obrobku za co nejkratší čas. Z toho důvodu je třeba stanovit parametry vstupující do procesu a na nich závislé výstupní charakteristiky.

Některé vstupní elektrické parametry jako proud, napětí, doba impulsu, doba pauzy a polarita elektrody už byly probrány. K těmto vstupním parametrům je třeba doplnit další velice podstatné faktory procesu. Je to především materiál obrobku a elektrody, čistota a tlak dielektrika jakož i způsob přivedení dielektrika do pracovní mezery, tedy stav pracovního prostředí. Ke stavu pracovního prostředí se také přiřazují okolní pracovní podmínky stroje jako vlhkost vzduchu, prašnost, teplotu okolí a v neposlední řadě postavení stroje v rámci výrobního rozložení technologických operací. Dalším vstupním parametrem procesu může být vybavení stroje velmi přesnými vychylovači elektrod ve čtyř i více osách a tím možnost dosažení orbitálního pohybu.

Oproti konvenčním metodám obrábění má technologie elektrojiskrového hloubení při hodnocení výstupních charakteristik svoje zvláštnosti. Mimo kvantitativního hodnocení charakteristiky rychlosti úběru materiálu, je to relativní opotřebení nástroje. Tento další výstupní parametr se vypočte jako velikost erodovaného materiálu z elektrody nástroje za jednotku času děleno velikostí erodovaného materiálu z obrobku za stejnou jednotku času. Viz rov. 3.1 (7).

$$\vartheta = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kde:  $V_n$  ..... objemové opotřebení nástroje,

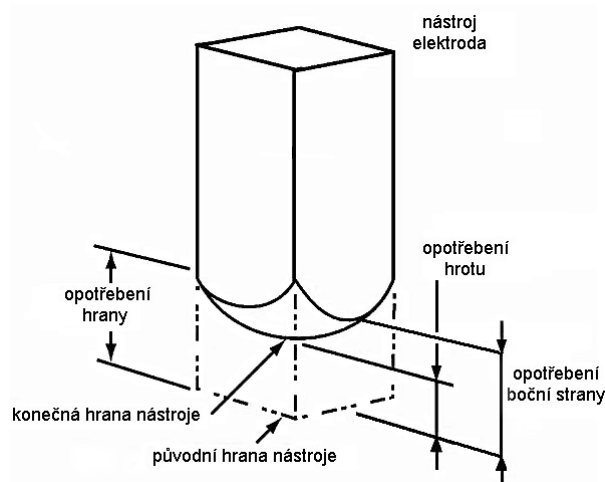
$V_o$  ..... odebraný objem materiálu obrobku.

K opotřebení elektrody dochází kvůli těmto příčinám:

- v důsledku vysoké hustoty elektronů v oblasti výboje dochází k oddělování jednotlivých iontů a nebo celých částic kovu,
- v důsledku kolísání proudu výboje a nebo vlivem polaritý výboje se rozrušuje povrch nástrojové elektrody,
- v důsledku termických vlivů jako vysoká teplota výboje ,
- v důsledku mechanických nárazů částic oddělených od povrchu obrobku,
- v důsledku nepříznivých pracovních podmínek jako špatné proudění dielektrika,
- nehomogenita materiálu elektrody.

Obr. 1.11 znázorňuje charakteristické oblasti opotřebení nástrojové elektrody čtvercového průřezu a používané termíny pro jeho hodnocení. Opotřebení nástroje se objevuje nejdříve na hranách nástroje. Na intenzitu úběru materiálu elektrody (opotřebení nástroje) je třeba tudíž brát značný zřetel. Může být řečeno, že hodnocení opotřebení nástroje je kvantitativní, avšak vzhledem k důležitosti zachování tvaru elektrody pro budoucí přesnost dutiny obrobku, toto tvrzení není jednoznačné.

Poslední výstupní charakteristikou je integrita povrchové vrstvy po EDM. Přesná definice integrity povrchu neexistuje. Lze ji však chápat jako soubor vlastností předem neurčeného rozsahu, u kterých se předpokládá vliv na funkční vlastnosti součásti. Tyto vlastnosti můžou být změněny nebo vytvořeny technologickým procesem a následně ovlivňovat budoucí tvarovou přesnost obrobku. (7)



Obr.1.11 Charakteristické oblasti opotřebení nástrojové elektrody (7)

### 1.7.1 Materiál a polarita elektrod a jejich vliv na obrobitelnost kovů

Jak už bylo napsáno, obrobitelnost kovů při elektroerozivním obrábění není závislá na mechanických vlastnostech materiálu, ale na fyzikálních. Obrobitelnost je tedy především závislá na teplotě tavení, elektrické a tepelné vodivosti. Jediným skutečným omezením obrobitelnosti je pouze schopnost vést elektrický proud. Z toho důvodu je možné elektroerozivním obráběním opracovat prakticky všechny kovové materiály.

#### *Vliv materiálu elektrod na výstupní charakteristiky*

Jelikož úběr materiálu probíhá i na straně elektrody, je třeba dbát také na fyzikální vlastnosti elektrod. Prvotní požadavky materiálu elektrody jsou elektrická vodivost a nízké opotřebení. V zásadě nejlepší materiály mají vysoký bod tání a velmi malý elektrický odpor. Materiály nástrojových elektrod účinkují s různým stupněm úspěšnosti na různé materiály obrobku. Výběr jednotlivého uspořádání materiálu elektrod závisí v první řadě na specifickém použití a na obráběném materiálu. Měď má sice nižší teplotu tání avšak malý měrný elektrický odpor. Vlastnosti grafitu jsou přesně opačné. Naopak wolframová měď splňuje obě podmínky současně. Rozdíly ve velikosti kráteru mohou být přičteny různým teplotám tavení a různým hodnotám měrných elektrických odporů materiálů. Z toho důvodu je dobré při hodnocení vlivu vstupních faktorů na výstupní charakteristiky brát v úvahu vždy jen jednu materiálovou dvojici elektroda obrobek.

Opotřebení elektrody je závislé na materiálu elektrody a energii vybíjení. Materiály mající dobré opotřebení elektrody jsou ty, které jsou také těžko obrobitelné. Tyto materiály vyžadují velké množství energie k tavení a obvykle mají i vysoký bod tání. Vyšší teplota tavení značí nižší opotřebení elektrody. Bylo zjištěno, že rychlost opotřebení elektrody je nepřímo úměrná k bodu tání materiálu elektrody. Cu-W má nejvyšší teplotu tavení a z toho důvodu nejnižší opotřebení nástroje.

Kvůli nižší teplotě tavení měděné elektrody je její rychlost opotřebení nejvyšší a intenzita úběru nejnižší, ale drsnost povrchu obrobene součásti je nejlepší mezi všemi třemi elektrodami. Jako taková se hodí pro obrábění karbidu wolframu v dokončovacím procesu. Nicméně z hlediska dobrého opotřebení by byl bezpochyby nejlepší výběr Cu-W. Má totiž velmi dobrou odolnost proti opotřebení. To znamená, že povrch elektrody není snadno erodovatelný a udržuje rozměrovou přesnost obrobku na vysoké úrovni. Kromě toho, jestliže je elektroda opotřebována, elektrická energie je ztracena a erodovaný materiál elektrody přispívá k destabilizaci v pracovní mezeře. Oba jevy jsou nežádoucí a můžou zmenšit úběr materiálu. (1)

### ***Vliv polarity elektrod na výstupní charakteristiky***

Polarita nástrojové elektrody hraje zásadní roli v obrobitelnosti materiálu. Podle zapojení elektrického obvodu se rozděluje na polaritu přímou a nepřímou. Přímá polarita značí takové zapojení obvodu převládá-li úbytek na anodě a tudíž obrobek představuje kladnou elektrodu zatímco nástrojová elektroda představuje zápornou elektrodu. U nepřímé polarity nebo také zvané obrácená polarita, převažuje úbytek na záporné elektrodě, proto je obrobek zapojen na záporný pól zdroje a nástrojová elektroda na kladný pól.

Výboj elektrickou jiskrou dává větší úbytek anody proti katodě tudíž je vhodné použití přímé polarity. Vzhledem nižší energii ve výbojovém kanále při menším časovém využití výboje a tudíž menšího úběru materiálu, je tato polarita vhodnější pro dokončovací operace.

U výboje nestacionárního elektrického oblouku převládá úbytek katody oproti anodě. U tohoto výboje je tedy lepší zvolit polaritu nepřímou. Tento druh

zapojení, při kterém je energie jednotlivého výboje na vysoké hodnotě, je určen především pro hrubovací operace.

Záporná polarita produkuje poměrně konstantní opotřebení, kdežto pozitivní polarita má obecně klesající trend. Ve vysokých nastaveních proudu se hodnoty opotřebení pro zápornou i kladnou polaritu elektrod sbíhají.

Při obrábění karbidu wolframu je více žádané použití záporné elektrody, protože intenzita úběru materiálu je vyšší a současně je opotřebení nižší oproti použití kladné elektrody. Záporná polarita dává též i lepší drsnost povrchu.

Volba polarity elektrod hraje důležitou roli při rozhodování o konečné struktuře povrchu. Kladné elektrody jsou známé produkcí dna kráteru nepravidelné struktury. Naopak obrábění se zápornou polaritou elektrody má za následek ploché krátery s hladkým povrchem a lem kráteru je zvýšen jen mírně nad oblast povrchu obrobku .

Tento jev může objasnit následující tvrzení. Když byl proud dostatečně vysoký, probíhalo vypařování kovu anody. Tento tok atomů vycházejících z anody se střetával s elektrony přicházející k anodě. Některé atomy kovu se z ionizovali, ale elektrony získaly další energii z anodového úbytku a udeřily do anody a působily větší vypařování a odstranění materiálu. Anoda přijala elektrony, které ztratily svoji výstupní práci (vypařovací teplo elektronů) a svoji energii díky anodovému úbytku. Karbid wolframu byl vypařen z anody nebo vyloučen ve formě kapiček za teploty vyšší než bod tání (2597 °C) anody. Tyto účinky přinášely vysoké rychlosti obrábění a velmi malé opotřebení nástroje .

Vliv polarity elektrody je také možné vidět na výměně záporného a kladného náboje vygenerovaných částic ve vybíjecím kanále. Vytváření tepla na obrobku je vyšší s větším množstvím částic stejného druhu pohybujících se směrem k jeho povrchu. Mimoto kladné částičky větší velikosti jsou schopné vytvářet více tepla než záporně nabitě částičky o stejné nárazové rychlosti. Proto tedy, kde má být v operaci minimalizováno opotřebení elektrody, je vybrána polarita elektrody taková, že relativní uvolnění tepla na obrobku je vysoké na konci doby impulzu. Velmi krátká doba impulzu, je víc záporných

částec v pohybu, požaduje elektrodu se zápornou polaritou. Naopak při dlouhém impulzu obráběcího procesu je účinnější kladná elektrody. (1)

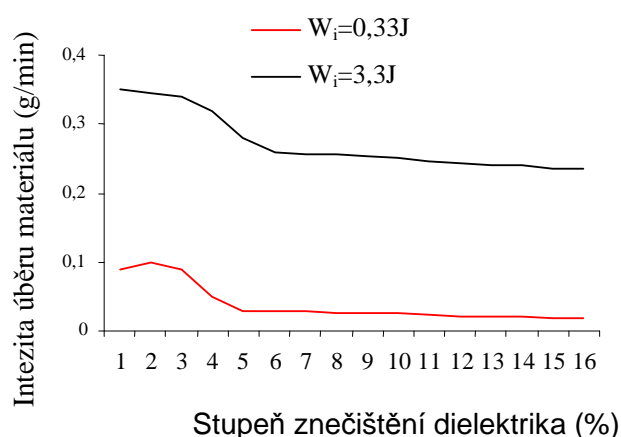
### 1.7.2 Vliv dielektrika a stav pracovního prostředí

Druh pracovního prostředí a jeho stav má prvořadý význam pro bezporuchový průběh elektrické eroze. Pracovní prostředí působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovního prostoru, ohraničuje výbojový kanál, umožňuje transport odebraných částic z místa výboje a zabraňuje usazování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody, jehož následkem by docházelo ke zkratům.

Elektrojiskrový výboj mezi elektrodami probíhá v různém pracovním prostředí, které může být nevodivé jako petrolej, olej a vzduch či polovodivé vodní sklo, kaolínová emulze a různé solné roztoky.

Úlohou dielektrika je také odplavování produktů eroze. Tyto produkty mohou být ve formě kompaktní látky nebo plynu. Pevné odpadové produkty bývají zachycené na opracovaném materiálu nebo na nástrojové elektrodě, kde vytváří izolační vrstvu a zabraňují elektroerozivnímu procesu. Plyny, pokud nejsou odstraněny, mají podobný účinek. Důležitou podmínkou stabilizace erozivního procesu je rychlé odstranění produktů eroze a zároveň obnovení čistoty dielektrické kapaliny v oblasti obrábění. Obnovení čistoty je obvykle zabezpečeno filtrací dielektrické kapaliny skrz filtrační zařízení, které zachytává částice velikosti 2÷5  $\mu\text{m}$ .

Na obr. 1.12 je ukázán vliv znečištění dielektrické kapaliny na intenzitu úběru. Při znečištění do 2 % se účinnost výrazně nemění. Při 2÷4 % znečištění a malé energii se intenzita úběru materiálu snižuje o 30÷40 %. Tento úbytek účinnosti je vysvětlen tak, že s přibývajícím energií výboje se mezera mezi elektrodami zvětšuje, takže odpad je možné lépe odstranit a dielektrikum se v místě výbojů tolik neznečistí. (1)

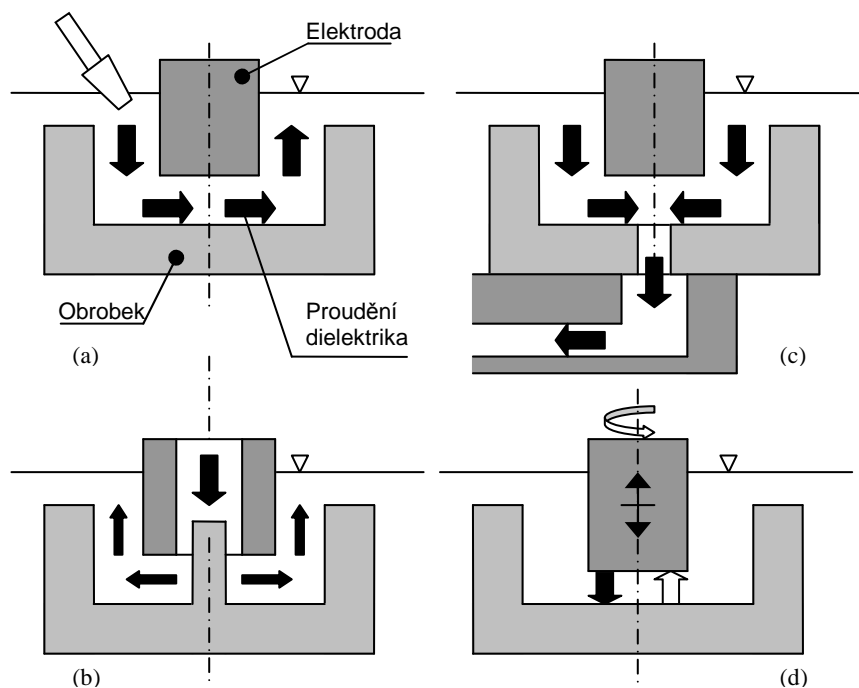


Obr. 1.12 Vliv znečištění dielektrika na intenzitu úběru (8)

Nezbytnou součástí všech moderních strojů je agregát pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. Úkolem tohoto zařízení je přivádět do pracovního prostoru dielektrikum v požadovaném množství, tlaku a čistotě, při současném zajišťování tepelné stabilizace stroje. Pro vlastní filtraci se používají zařízení různých konstrukcí jako průtočné papírové filtry, usazovací filtry, odstředivé filtrační zařízení. Z hlediska vlastní realizace vyplachování existuje řada konstrukčních uspořádání:

- Vnější vyplachování (viz.obr. 1.13a): tato varianta patří mezi nejobecnější způsoby přívodu dielektrika. Při obrábění hlubších dutin se doporučuje kombinovat s přerušovaným (pulsním) vyplachováním.
- Tlakové vnitřní vyplachování (viz.obr. 1.13b): při tomto způsobu je dielektrikum přiváděno otvorem v nástroji přímo do pracovního prostoru. Uvedený způsob zhoršuje tvarovou přesnost na bočních plochách, jelikož odváděné částice jsou zdrojem bočních výbojů.
- Vyplachování odsáváním (viz.obr. 1.13c): tento způsob poskytuje velmi dobrou tvarovou přesnost. V případě hloubení složitých dutin je možné kombinovat tlakové vnitřní vyplachování a odsávání.
- Pulsní vyplachování (viz.obr. 1.13d): způsob výplachu pomocí oddalování elektrody, někdy kombinované s rotací. Vyplachování je obvykle synchronizováno na zpětný pohyb elektrody. Při vyjíždění elektrody se vypíná pracovní proud, aby nedocházelo k bočním výbojům a současně se do pracovního prostoru začíná přivádět dielektrikum. Proud je opět spuštěn až po

nastavení elektrody na pracovní vzdálenost. Moderní CNC řídicí systémy umožňují pružné programování zejména pulsních způsobů vyplachování. (1)



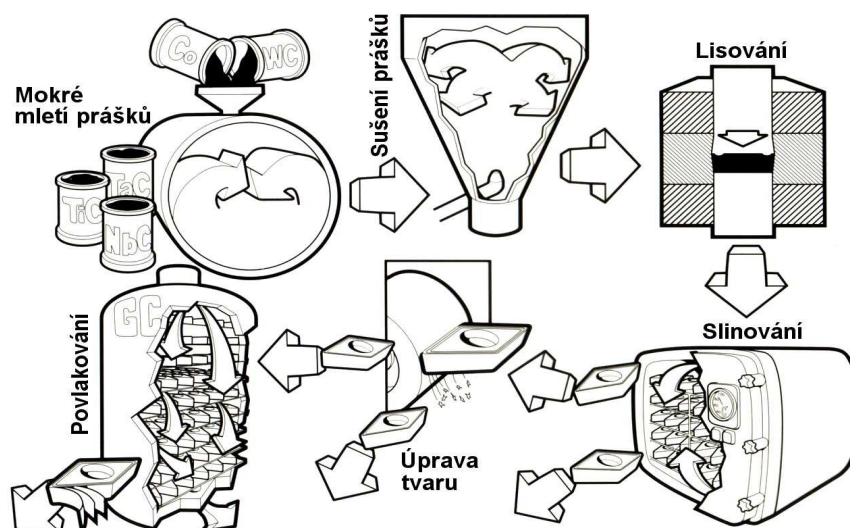
Obr. 1.13 Schéma konstrukčních uspořádání vyplachování (1)



## 2 VÝROBA VYMĚNITELNÝCH BŘITOVÝCH DESTIČEK SK

Obecný postup výroby VBD ze slinutých karbidů lze rozdělit do následujících základních operací:

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC, NbC) a kobaltu,
- příprava směsí uvedených prášků
- formování směsí
- předslinování zformovaných směsí (kolem 1000 °C) - tato operace je většinou spojena s operací slinování,
- úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby),
- slinování (1350-1650 °C)
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP - Hot Isostatic Pressing), kdy probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu, která se blíží teoretické hodnotě, s minimálním objemem pórů a jiných vad a při aplikacích pro řezné nástroje proto dosahují nejvyšších hodnot trvanlivosti.
- dodatečné úpravy povrchu (broušení, povlakování ). (3)



Obr. 2.1 Výroba VBD ze slinutých karbidů (3)

## 2.1 Příprava směsi karbidů a pojiva

Příprava směsi karbidů s pojícím kovem (kobaltem, který se získá redukcí oxidů kobaltu ve vodíkové atmosféře) je jednou ze základních operací při výrobě slinutých karbidů, protože výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného produktu (velmi důležité je zejména dodržení požadovaného poměru jednotlivých složek směsi). Hlavním cílem dané operace je vytvoření jemnozrnné, homogenní práškové směsi karbidů a pojícího kovu (v mikroobjemu) mletím směsi za sucha nebo v kapalném prostředí (např. etylalkohol, metylalkohol, dichlóretylén, trichlóretylén, aceton, benzín, někdy i voda, v množství asi 0,25 litru na 1 kg směsi). Zvláště je důležité, aby po ukončení procesu byla jemná, rovnoměrně rozptýlená karbidická zrna dokonale obalena ještě jemnějším práškem pojícího kovu (to znamená, že původní práškový kobalt musí mít nejjemnější možnou strukturu). Mokrý mletí je výhodnější zejména z toho důvodu, že pracovní kapalina napomáhá disperzi jednotlivých částic, protože ve vznikajících úzkých trhlinkách dochází působením kapilárních sil k nárůstu napětí, trhlinky se rozšiřují a rozrušují konglomerát i jednotlivá zrna. Další výhody mokrého mletí lze vidět v minimalizování pracovní teploty a ochranném účinku proti oxidaci. Nevýhodou mokrého mletí je požadavek dokonalého vysušení směsi po skončení mlecího procesu (vzhledem k použitým kapalinám, které mají vesměs nízké hodnoty bodu varu, nečiní však jejich následné odstranění žádné zvláštní potíže).

Mletí obvykle probíhá v kulových mlýnech (kulový nebo častěji válcový buben naplněný mlecími koulemi, který se otáčí kolem horizontálně orientované osy), kde při pohybu uvnitř bubnu působí mlecí koule na pracovní směs rázovým a třecím účinkem. Rázovým účinkem působí pouze ty koule, které se nacházejí poblíž stěny bubnu (rozmělňují konglomeráty a jednotlivá zrna karbidů i pojícího kovu a tím zmenšují jejich rozměry), třecí účinek je považován za velmi důležitý zejména z hlediska dokonalého rozmíchání a homogenizace směsi (účastní se ho všechny koule). Koule, podobně jako obložení stěn mlýnu, by měly být ze stejného druhu slinutého karbidu, pro který je směs připravována (jinak může dojít k znečištění směsi nežádoucími produkty z opotřebení koulí), jejich průměr se obvykle pohybuje v rozmezí 8-15 mm. Poměr objemů

koule/směs bývá asi 2,5, ve speciálních případech, kde je požadováno zvlášť intenzivní mletí, dosahuje někdy hodnot 5-10. Mlecí účinek může být zvyšován vibracemi pružně uloženého mlýnu.

Proces mletí je dlouhodobý a trvá několik dnů (48-72 hodin, pro nejjemnější směsi někdy až 96-120 hodin), po mletí se směs prášků prosívá.  
(3)

## 2.2 Formování směsi

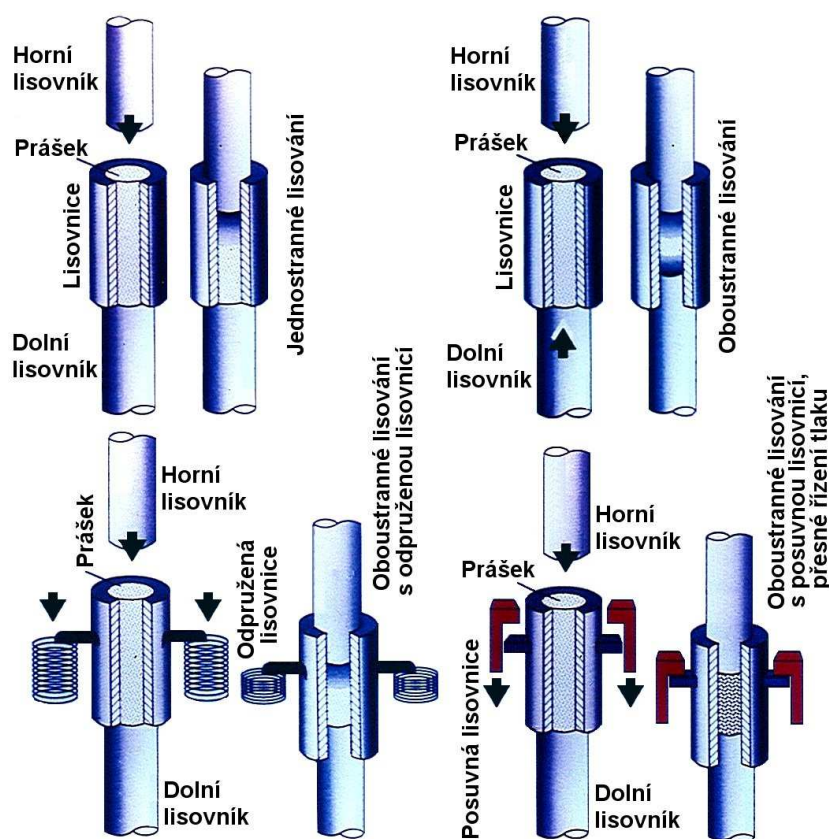
Směs práškových karbidů a pojícího kovu lze formovat lisováním ve formovacích lisech (tato metoda je užívána nejčastěji, zejména při výrobě vyměnitelných břitových destiček), hydrostatickým lisováním, vytlačováním přes trysku požadovaného tvaru nebo litím do pomocných forem.

Protože jde o tvarování vysoce disperzních směsí s nízkou plasticitou, přidává se do nich látka (tzv. plastifikátor, v množství 0,5-2%), která usnadňuje vzájemný skluz částic (zvyšuje tak stupeň zhutnění směsi), přidává polotovaru doplňkovou pevnost (v důsledku své tmelící schopnosti) a zaručuje zachování tvaru po vyhození polotovaru z lisovací formy. Plastifikátor musí splňovat několik základních požadavků, především se musí nechat lehce odstranit při sušení nebo předslinování za nižších teplot a nesmí znečistit polotovar nežádoucími příměsemi. Pro daný účel jsou užívány většinou tyto látky:

- syntetický kaučuk rozpuštěný v benzínu (výhody: značná pevnost výlisku, možnost užití poměrně rychlých lisů, možnost odstranění až při slinování; nevýhoda: nedá se úplně odstranit),
- parafín rozpuštěný v tetrachlórmetanu nebo benzénu (výhody: umožňuje lisování při vyšších tlacích, jde snadno odstranit; nevýhody: musí se odstranit ve speciální peci před slinováním, má nižší tmelící schopnost a pružnost než kaučuk a proto nelze použít rychlé lisy)

Lisovací tlaky jsou relativně nízké a pohybují se v rozmezí 50-150 MPa. Výlisek musí být rovnoměrně zhutněn v celém objemu a proto je nejčastěji používán princip dvojstranného lisování, kdy se dva písty pohybují proti sobě a

lisují směs, která se nachází mezi jejich čelními plochami (čelní plochy pístů mohou mít například negativní tvar čela břitové destičky, včetně utvařeče třísky). Lisy pro lisování polotovarů vyměnitelných břitových destiček jsou velmi často označovány jako "tabletové" nebo "pilulkové" a obvykle zaručují konstantní tlak ve všech směrech (takto lisované polotovary se vyznačují rovnoměrnějším zhutněním). Rozměry výlisku musí být větší, než jsou rozměry hotového slinutého výrobku, vzhledem k lineárnímu všesměrovému smrštění při slinování, které činí 20 i více procent. (3,5)



Obr. 2.2 Princip oboustranného lisování (3)

### 2.3 Izostatické lisování za studena

U této metody je prášková směs umístěna do pružné formy z latexu nebo silikonového kaučuku, která se následně uzavře, aby se do směsi nedostalo pracovní médium (tlaková kapalina).

Dvě různé varianty izostatického lisování za studena se liší způsobem vyvíjení tlaku - mechanickým tlakem pístu („dry-bag“, suchá metoda) nebo hydraulickým tlakem kapaliny („wet-bag, mokrá metoda).

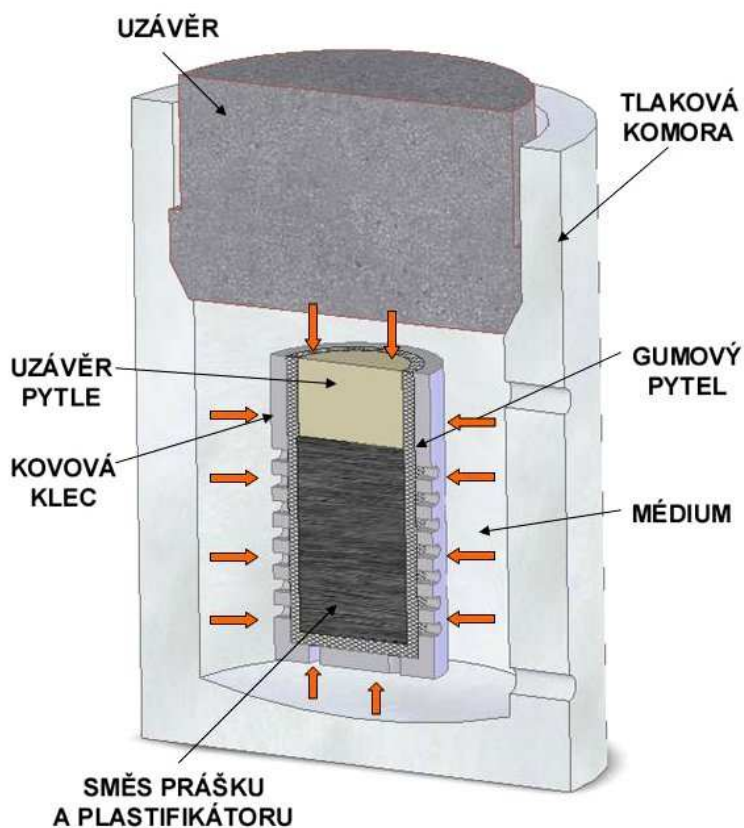
Suchá metoda se používá pro malé výlisky a celý proces lze plně automatizovat. Forma se vkládá do tlakové komory a až potom se naplní práškovou směsí. Po uzavření formy a zaplnění prostoru mezi stěnami komory a vnějším povrchem formy kapalinou je komora uzavřena.

Píst, který se pohybuje v ose komory směrem zdola nahoru, tlačí na pružnou formu a tím současně zvyšuje i tlak v pracovní kapalině, která obklopuje formu. Po skončení procesu je výlisek vytlačen pístem z komory. Konečnou operací je odstranění rozšířeného dolního i horního čela výlisku („sloní nohy“).

Mokrá metoda je používána pro rozměrné součásti a není možné ji zcela automatizovat. Forma je naplněna mimo tlakovou komoru, uzavřena a po setřesení prášku je z ní odsán přebytečný vzduch. Aby nedošlo při lisování k jejímu poškození, vkládá se do ocelového koše a poté je spolu s ním umístěna do tlakové komory. Po uzavření komory je tlakem pracovní kapaliny (ve většině případů se jedná o emulzi voda-olej) vylišována požadovaná součást. V tomto případě se rozšířené čelo tvoří pouze v horní části výlisku. Časový průběh lisování lze u obou metod rozdělit do tří etap, nárůst tlaku, výdrž na konstantním tlaku a snižování tlaku. Etapa nárůstu tlaku nemá vliv na vlastnosti vylišované součásti a může proto být poměrně krátká, hodnota rychlosti nárůstu tlaku se pohybuje kolem  $20 \text{ MPa min}^{-1}$ . Výdrž na maximálním tlaku (podle příčného průřezu výlisku, např. 300 MPa), která je nutná pro dosažení optimálního a rovnoměrného tlaku v celém průřezu výlisku, závisí zejména na vlastnostech prášku a rozměrech výlisku. Největší vliv na vlastnosti výlisku má etapa snižování tlaku, která se dělí na několik částí. Na začátku je rychlost poklesu tlaku poměrně vysoká. V momentě, kdy se začne výlisek oddělovat od formy musí být ale snížena, aby bylo zajištěno jejich úplné oddělení. Poté může být rychlost znovu zvýšena až do okamžiku, kdy se z výlisku začne uvolňovat stlačený vzduch (jedná se o nejkritičtější fázi, protože rychlé snížení tlaku by mohlo vést ke vzniku trhlin). (3,5,10)

Práce vynaložená na zhutnění výlisku se skládá ze čtyř složek (velikost jednotlivých složek je různá a závisí na složení a vlastnostech prášku a na typu lisovací operace):

- práce potřebná na překonání tření mezi jednotlivými částicemi prášku,
- práce potřebná na deformaci částic prášku,
- práce potřebná na překonání tření mezi částicemi prášku a stěnami formy,
- práce potřebná na překonání pružných deformací v průběhu lisování. (3)



Obr. 2.3 Princip mokré metody (3)

## 2.4 Slinování

Změna pórovitého výlisku na kompaktní výrobek probíhá zejména v důsledku změn podmíněných fázovým diagramem daného systému, ale též v důsledku dalších fyzikálně chemických pochodů. Slinování je pravděpodobně nejkritičtější fází výrobního procesu slinutých karbidů.

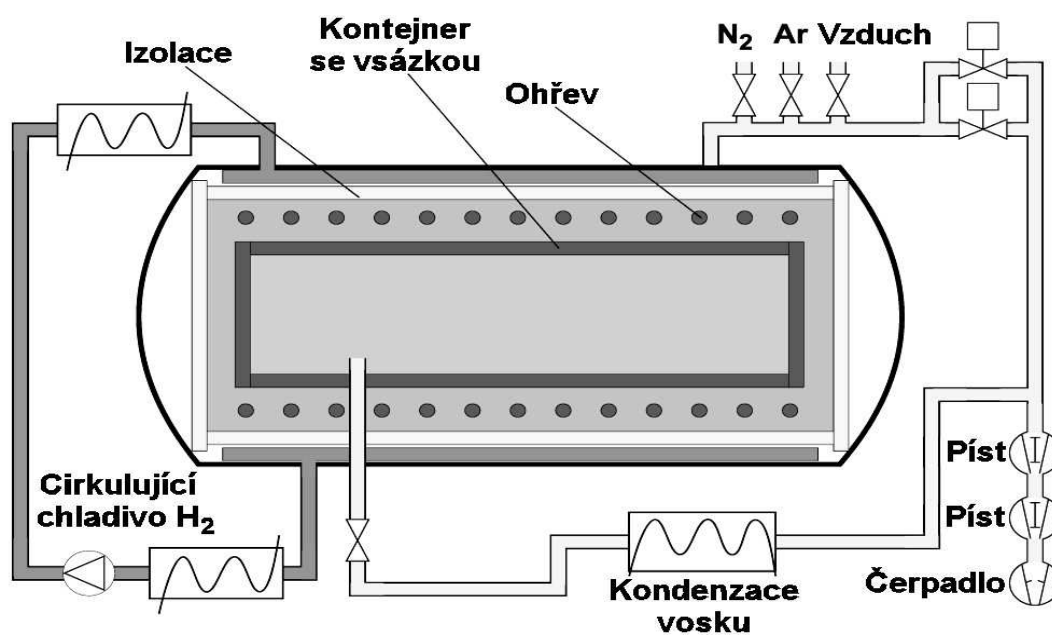
Slinování může probíhat v ochranné atmosféře (vodík, vyčištěný a hlavně dokonale vysušený, s minimálním obsahem kyslíku - atmosféra výhodná

zejména pro materiály WC-Co a materiály WC-TiC-Co s nízkým obsahem TiC), nebo ve vakuu a má obvykle tři etapy:

- předběžný ohřev (na teplotu 700-1000 °C, v této fázi dochází např. k odstranění plastifikátoru)
- ohřev na pracovní teplotu a výdrž na této teplotě (teplota, která je nad teplotou vzniku tekuté fáze; podle obsahu Co v materiálech typu WC-Co a obsahu TiC a Co v materiálech typu WC-TiC-Co se pohybuje v rozmezí 1350-1650 °C, nižší hodnoty platí pro vyšší obsah kobaltu a jemnozrnější výchozí prášky),
- ochlazení

Vodíková atmosféra není vhodná pro vyměnitelné břitové destičky, protože v ní často dochází k vytváření nežádoucích povlaků (výhodnější je tedy slinování ve vakuu, i když uvedené povlaky lze odstranit např. broušením). Některé pece proto umožňují slinování v atmosféře  $H_2$  v počátečním stadiu a slinování ve vakuu v konečném stadiu celého procesu.

Pece pro slinování mají zpravidla příčný průřez 100 až 300 cm<sup>2</sup> a délku 1-2 m (obr. 2.4), slinované výrobky, uložené v grafitových kontejnerech (pokud jsou výrobky ná-chylné k nauhličování, jsou vnitřní stěny kontejnerů pokryty izolační vrstvou prášku  $Al_2O_3$ ) postupně procházejí celým pracovním prostorem pece. Po opuštění horkého pracovního prostoru postupují kontejnery do ochlazovacího prostoru, který obvykle přímo navazuje na ohřívací pec (podobně jako ohřev je i ochlazování nejčastěji postupné, v některých případech, pokud to režim tepelného zpracování umožňuje, mohou být výrobky ochlazeny i náhle). Po potřebném ochlazení jsou hotové výrobky vyňaty z kontejnerů a tím je proces slinování ukončen. (3)



Obr. 2.4 Schéma slinovací pece (3)

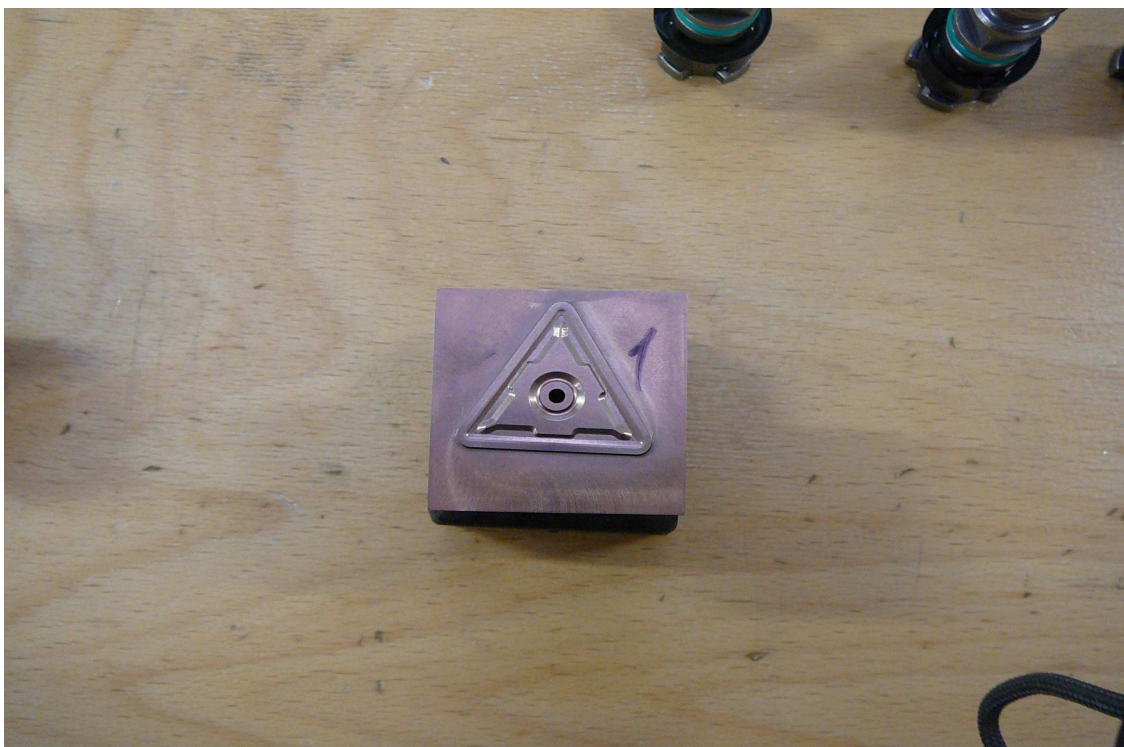


### 3 APLIKACE ELEKTROEROZIVNÍHO HLOUBENÍ

Jednou z nejrozšířenějších oblastí uplatnění EDM je hloubení dutin kovacích zápustek, tvářecího lisovacího nářadí, forem pro tlakové lití a lisování plastických hmot a výroba střížných nástrojů. V porovnání s třískový obráběním je využití elektroerozivního obrábění ekonomické při výrobě tvarově složitých dutin i při malých počtech obráběných kusů. Významnou aplikací je také obnova (prohlubování) opotřeбенých dutin, např. kovacích zápustek ve zpevněném stavu.

Nejrozšířenější aplikací EDM hloubení v průmyslu je odstraňování ulomených nástrojů (vrtáků, závitníků, výstružníků apod.) z obráběných dílů. Tímto způsobem se zachraňují obrobky často i mnohamilionových hodnot, např. velké zalomené hřídele pro lodní motory, díly pro jaderné reaktory apod. Pro tyto operace se používají jednoduchá přenosná zařízení, která se umísťují přímo na obrobek nebo vedle obrobku. Jako dielektrikum se používá voda (i průmyslová) přidávaná do nástrojové elektrody, která je tvořena měděnou trubicí odpovídajícího průměru. Jádro ulomeného nástroje se bez poškození obrobku odjiskří a zbytky jeho řezné části se snadno vyjmou.

V našem případě se jedná o elektroerozivní hloubení nástrojů pro lisování vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu, lisovníků a lisovnic. Čelní plochy lisovníků mohou mít například negativní tvar čela břitové destičky, včetně utvařeče třísky. Do lisů lze upínat nástroje (lisovníky a lisovnice) pro výrobu různých typů VBD.



Obr. 3.1 Lisovník s negativním tvarem VBD



Obr. 3.2 Lisovník s negativním tvarem VBD

### 3.1 Základní technické parametry EDM na hloubení:

- el. proud: pracovní napětí.....až 50 V  
                   velikost proudu.....0,5-320 A a více  
                   frekvence.....50-5·10<sup>5</sup> Hz
- dielektrikum
- parametry vlastního hloubení:
  - úběrovost (dle velikosti zařízení).....100-25000 mm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>
  - dosahovaná přesnost.....±0,12-0,05 mm
  - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (Ra):
    - hrubování
    - střed.opracování
    - jemné opracování
- elektrody

### 3.2 Volba nástrojové elektrody

Při volbě nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její materiál, výrobu (možnosti, cena) a opotřebení v průběhu daného procesu elektrojiskrového obrábění. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při vlastní práci nedeformoval. K základním metodám výroby nástrojových elektrod patří obrábění, lisování, lití, prášková metalurgie, stříkání a galvano-plastika.

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu, hodnotí se opotřebení boků, rohů a konce elektrody. Nejvýznamnější kritérium, které určuje trvanlivost elektrody a vymezuje nutnost její úpravy, je opotřebení rohů.

Protože např. lití měděné elektrody do požadovaného tvaru vede k tomu, že takto vyrobená elektroda nemá v celém objemu stejné fyzikální vlastnosti a navíc tato technologie je v případě kusové výroby finančně náročná, je nejčastější způsob výroby elektrod v běžné praxi třískové obrábění. Touto technologií dosáhneme velmi přesného tvaru nástrojové elektrody. V případě nutnosti je možno elektrojiskrové řezání využít i pro přestřžení elektrod k

odebrání tenké narušené vrstvy. Poté můžeme využít elektrodu pro další výrobu.

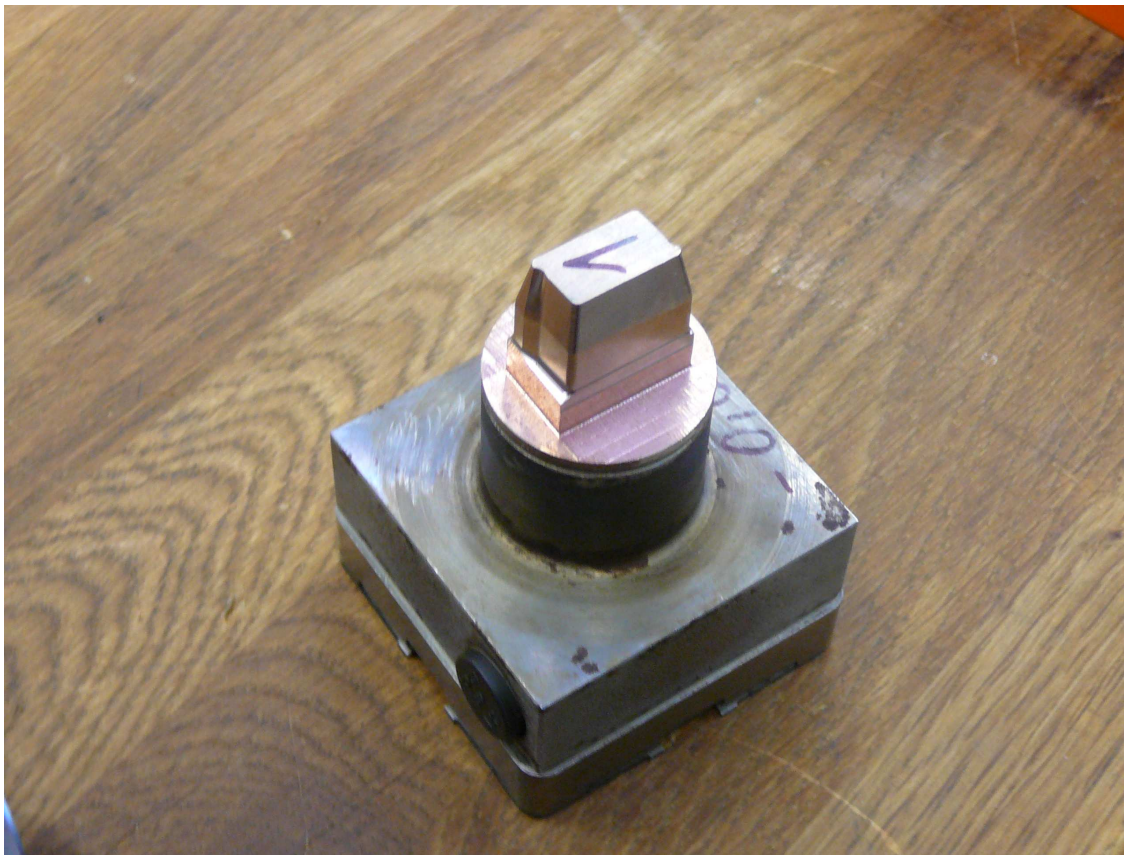
Materiál nástrojové elektrody se volí podle materiálu obrobku, použitého stroje a relativního objemového opotřebení nástrojové elektrody. Vybrané materiály podle účelného použití nástrojových elektrod v návaznosti na danou úlohu obrábění jsou uvedeny v tabulce 3.1.(8)

Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Poznámka
wolframkarbid	ocel	H	střední	malý úběr
		D	dobrá	
mosaz	ocel	H	dobrá	vhodné pro výrobu malých otvorů
		D	dobrá	
měď	hliník	H	dobrá	malý úběr
		D	dobrá	
mosaz	titan	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	litina	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	korozivzdorná ocel	H	střední	stabilita oblouku u některých jakostí ocelí je nejistá
		D	střední	
měď	wolframkarbid	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď-wolfram	ocel	H	dobrá	vhodné pro malé vysoce přesné lisovací nástroje
		D	dobrá	
slitina mědi	wolframkarbid	H	dobrá	vhodná pro výrobky z karbidu wolframu
		D	dobrá	
grafit	litina	H	dobrá	vyšší úběr při záporné polaritě, větší opotřebení elektrody
		D	dobrá	
grafit	měď	H	střední	malý úběr
		D	střední	
grafit	rychlořezná ocel	H	střední	střední úběr
		D	střední	
grafit	korozivzdorná ocel	H	střední	dobrý úběr
		D	střední	
grafit	ocel	H	dobrá	dobrý úběr
		D	dobrá	
grafit	wolfram	H	střední	střední úběr
		D	střední	

Tab. 3.1 Volba materiálu elektrody pro hrubování (H) a obrábění na čisto (D) (8)



V tomto případě byla použita měď-wolframová elektroda (viz. Obr.3.3).



Obr. 3.3 měď-wolframová elektroda

### 3.2.1 Obrábění Cu-W elektrod

Tento materiál je snadno obrobitelný a při obrábění se chová podobně jako šedá litina. Lze jej obrábět na běžném strojním vybavení. Podle katalogových údajů firmy Coromat jsou doporučené řezné destičky ze slinutých karbidů s označením skupiny M (žlutá). Díky materiálovým vlastnostem jako, je nízká tepelná roztažnost, může být Cu-W obráběn v malých tolerancích a velmi dobrých drsností. Chlazení není nutné. Cu-W polotovary jsou na trhu k dodání ve formách podobných mědi. (2)

### 3.3 Volba dielektrika

Dielektrická kapalina má důležitý vliv na celý erozivní proces a proto je třeba věnovat pozornost její volbě. Na kapalinu jsou kladeny následující požadavky :

- musí mít dostatečné dielektrické vlastnosti (odpor), aby průrazem dielektrika vznikl výboj,
- musí mít vhodnou viskozitu a smáčivost, zajišťující rychlé obnovení izolace v místě výboje. Pro hloubení je doporučený rozsah viskozity  $2\div 4 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- musí mít přijatelný bod vzplanutí. V průběhu výboje vznikají vysoké teploty, které způsobují oteplení elektrod a dielektrika. Bod vzplanutí použitého dielektrika nemá být nižší jak  $60^\circ\text{C}$ . I obvykle používaná dielektrika s body vzplanutí  $60\div 120^\circ\text{C}$ , vyžadují přísné dodržování bezpečnostních předpisů,
- musí být chemicky neutrální, aby zamezovala vzniku koroze,
- musí zabezpečovat dobrý odvod erozních zplodin ze zóny úběru materiálu,
- musí splňovat hygienickou a ekologickou nezávadnost. Nesmí docházet k rozkladu vzniku zdraví nebezpečných plynů. Například při obrábění ve standardním petroleji mají vznikající plyny následující složení:  $\sim 63\% \text{H}_2$ ,  $13\% \text{C}_2\text{H}_4$ ,  $16\% \text{C}_2\text{H}_2$ . Z uvedeného složení je zřejmá nutnost odsávání plynů v případě velkých výkonů obrábění,
- měla by mít nízkou cenu.

Skoro všechny tyto vlastnosti mají lehké strojní nebo transformátorové oleje nebo petrolej. Používá se též kerosin, silikónový olej a dielektrika na bázi vody. Pro elektroerozivní řezání se používá de-ionizovaná voda, která má nízkou vodivost. Přední zahraniční firmy dodávají speciální dielektrika, určená pro elektroerozivní stroje. Tabulka 3.2 ukazuje přehled dielektrik dvou výrobců a jejich fyzikální vlastnosti.

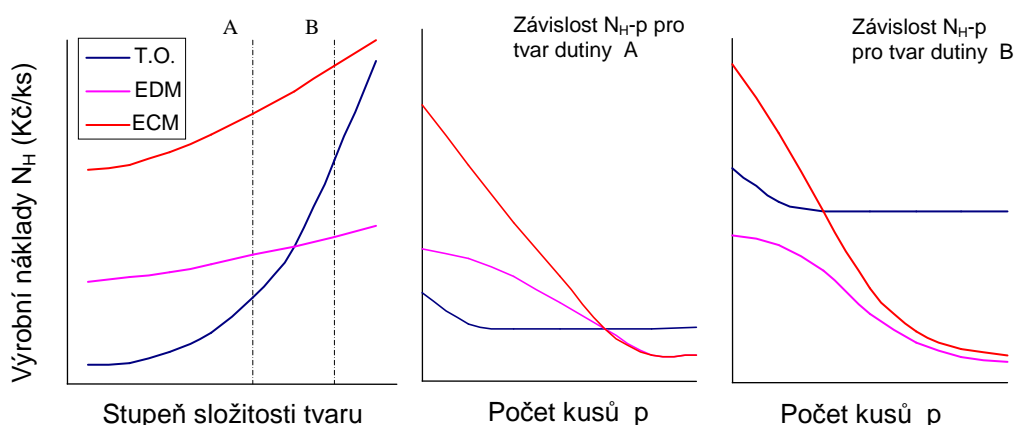
Výrobce-Typ	Esso- DEFLUID- 39	Esso- DEFLUID- 33	Elektroflux – DF	Elektroflux – TE
Hustota při 15 °C[kg/mm <sup>3</sup> ]	780	785	750	764
Kinematická viskozita při 20 °C [mm <sup>2</sup> /s]	4,7	2,6	1,83	2,75
Kinematická viskozita při 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	3	1,9	1,35	1,8
Bod vzplanutí °C	115	86	73	100
Průrazné napětí [kV/2,5mm]	30	32	-	-
Elektrická vodivost [pS/m]	40	<10	-	-
Obsah aromátů	< 0,1	<0,02	Nepřítomny	Nepřítomny

Tab. 3.2 Přehled dielektrik a jejich fyzikální vlastnosti (8)

#### 4 TECHNICKOEKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Elektroerozivní hloubení je v současné době v běžné praxi stále více využíváné. Důvod rostoucího využití v průmyslu, co do objemu výroby, je možné hledat ve dvou základních trendech posledních patnácti let. Byl učiněn značný rozvoj strojního vybavení nejen v rozšíření možnosti použití, ale i ve značném snížení nároků na obsluhu stroje. Tím mohlo být elektroerozivní obrábění zpřístupněno širšímu uživatelskému spektru v oblasti strojírenské výroby. Během těchto let se též změnila i struktura průmyslu, která se rychle začala měnit podle požadavků trhu. Především však zaznamenal nárůst podílu automobilový průmysl. Domácí dodavatelské firmy mnohdy navíc využívají i možnosti spolupráce se zahraničními společnostmi.

Tohle vše vede k poptávce po výrobních technologiích umožňující rychle a efektivně zhotovit formu pro takovéto nejrůznější produkty. Počet společností, které využívají elektroerozivní obrábění narostl, což vedlo k potřebě EDM strojů, nejrůznějších náhradních dílů a spotřebního materiálu. Firmám dodávajícím na trh EDM technologie se zvedla konkurence, která do jisté míry tlačí ceny směrem k nižším hodnotám. I přes snížení nákladů při zavedení EDM technologie do výroby, zůstává finanční náročnost těchto technologií stále vyšší než konvenční třískové obrábění.



Obr. 4.1 Obecné porovnání celkových nákladů při výrobě dutin (8)

Příklad obecného porovnání dvou nejrozšířenějších nekonvenčních metod a třískového obrábění při výrobě dutin je uveden na obr. 4.1. Z rozboru



celkových nákladů je zřejmé, jak vysoce ekonomicky výhodné může být nasazení elektroerozivního obrábění (EDM) pro výrobu tvarově složitých dutin, již při malých počtech kusů.

#### 4.1 Celkové náklady na EDM hloubení jedné součásti

Celkové náklady na hloubení jedné součásti lze stanovit podle následujících základních vzorců (8):

$$N_H = N_{sh} + N_{nh} + N_{vnh} \quad (4.1)$$

kde:  $N_H$  ..... celkové výrobní náklady na hloubení jedné součásti v Kč,

$N_{sh}$  ..... náklady na strojní práci v Kč,

$N_{nh}$  ..... náklady na nástroje pro jednu součást v Kč,

$N_{vnh}$  ..... náklady na výměnu, resp. znovu seřízení opotřebovaných nástrojů v Kč.

$$N_{sh} = N_{hs} \times t_A \quad (4.2)$$

kde:  $N_{hs}$  ..... hodinové náklady na provoz stroje v Kč/hod,

$t_A$  ..... součet strojních a vedlejších časů pro hloubení jedné součásti v hod.

$$t_A = t_{AS} + t_{vn} + t_{AV} \quad (4.3)$$

kde:  $t_{AS}$  ..... celkový strojní čas hloubení jedné součásti (hrubování i dokončování),

$t_{vn}$  ..... čas výměny elektrod z podavače,

$t_{AV}$  ..... čas přesunu elektrod v případě více zahloubení.

$$N_{nh} = (q_{Eh} \times N_{Eh} + q_{Ed} \times N_{Ed}) / q_{otv} \quad (4.4)$$

kde:  $N_{Eh}$  ..... náklady na výrobu jedné hrubovací elektrody v Kč (až 100 tis.kč.),

$N_{Ed}$  ..... náklady na výrobu jedné dokončovací elektrody v Kč,

$q_{he}$  ..... počet hrubovacích elektrod,

$q_{de}$  ..... počet dokončovacích elektrod,

$q_{otv}$  ..... počet možných obnovení tvaru elektrod.

$$N_{vnh} = q_E \times n_{otv} \quad (4.5)$$

kde:  $q_E$  ..... počet elektrod použitých při hloubení jedné součásti,  
 $n_{otv}$  ..... náklady na obnovení tvaru jedné elektrody (až 20 tis. Kč.).

$$n_{vnh} = t_{otv} \times N_{hsř} \quad (4.6)$$

kde:  $t_{otv}$  ..... celkový čas obnovení tvaru elektrody v hod.,  
 $N_{hsř}$  ..... hodinové náklady na provoz využitého stroje v Kč/hod.

Z uvedených vzorců je vidět, že do celkových nákladů na EDM hloubení se započítává celá řada prvků. V první řadě jsou to náklady na strojní práci, do kterých patří: náklady na energie, náklady na amortizaci stroje, různé režijní náklady jako výměna dielektrika, výměna filtrů či náklady na případnou opravu stroje a samozřejmě náklady na práci obsluhy. Režijní náklady mohou být do značné míry variabilní. Je jasné, že pokud stroj nepracuje ve zvlášť intenzivním režimu, pak nebude dielektrikum příliš znečištěno. Poté se zákonitě sníží i potřeba častých výměn dielektrika a filtrů. Výše nákladů na práci obsluhy bude záležet na časovém vytížení stroje a kvalifikaci obsluhy, která koresponduje s obtížností výrobního programu. Významným krokem ke snížení nároků na obsluhu a tedy i nákladů bylo vybavení strojů plně automatickým zařízením pro manipulaci a upnutí nástrojových elektrod. Tím byl umožněn téměř bezobslužný provoz elektroerozivního hloubení. Pro představu hodinové náklady na provoz hloubicího stroje AGIE IMPACT 3 jsou orientačně 700 Kč/hod.

Strojní a vedlejší časy hloubicího procesu budou samozřejmě záležet na velikosti a stupni složitosti daného obrobku. Vedlejší časy upnutí a ustavení obrobku včetně nastavení nulového bodu zůstávají důležité. Vedlejší časy přejezdů a výměn nástroje jsou díky automatickému řízení minimální a vzhledem k dlouhým strojním časům hloubení, řádově několik hodin, prakticky zanedbatelné.

Podstatnou složkou nákladů jsou výdaje na výrobu a případné obnovení tvaru nástroje. Jak už bylo řečeno, částka příslušející na materiál elektrody může tvořit nezanedbatelný díl. Mnohem větší procento nákladů na zhotovení elektrody však připadá na samotnou výrobu. Této části je třeba věnovat pozornost, protože neefektivní výroba elektrod může značně navýšit náklady na

celé EDM hloubení. Často se řeší celá výroba elektrod v kooperaci, protože například grafit nelze obrábět na všech obráběcích strojích. Na druhé straně volba grafitu zefektivní výrobu vzhledem k použití 10krát menších řezných sil než pro měď.

## ZÁVĚR

Elektroerozivní hloubení se užívá zvláště pro obrábění žárovzdorných, žárovevých, vysokopevnostních materiálů, které jsou těžko zpracovatelné konvenčními metodami obrábění. Tento fakt je jedním ze základních hledisek při volbě EDM technologií. Další faktor bývá tvarová složitost obrobku, která je stále náročnější. Metodou EDM lze totiž obrábět relativně jednoduše složité tvary, které by byly konvenčními řeznými nástroji velice obtížně vyrobitelné, či by jejich výroba nebyla vůbec možná.

Cílem této práce byl komplexní náhled do problematiky elektroerozivního hloubení při výrobě vyměnitelné břitové destičky ze slinutého karbidu. V tomto případě se EDM technologie používá na výrobu lisovníků a lisovnic, které se používají při formování a lisování slinutého karbidu při výrobě VBD.

Podstata elektroerozivních metod je přírodní jev elektrického výboje mezi dvěma elektrodami. Zde se jedná o obrobek a nástrojovou elektrodu. Průběh elektrického výboje je však stále ještě nepřesně popisován. Mezi odborníky totiž zůstávají rozdíly při objasnění průběhu takového výboje. Určité procento pochybností může být problém při hodnocení výsledků obrábění a následném zavedení případných úprav vstupních faktorů procesu. Nejdůležitější vstup je výběr materiálu elektrod, protože správná volba může značně ovlivnit výsledky obrábění. Elektrické veličiny jsou především odvislé od charakteru dané operace (hrubování, dokončování). Základem je, že malé proudy spolu s malými doby impulsů dávají lepší drsnost a malou rychlost úběru oproti vysokým proudům a dlouhým dobám impulsů, které naopak zvyšují rychlost úběru materiálu a značně zhoršují drsnost povrchu. Volba polaritě elektrod závisí na materiálové dvojici obrobek-elektroda. Udržení správné teploty a čistoty dielektrika je podstatná pro zajištění správné geometrické přesnosti obrobku. Dosažitelná přesnost je totiž výrobcem stroje zaručena při určité teplotě a čistotě dielektrika.

Efektivní výroba nástrojových elektrod je pro proces EDM hloubení podstatná. Vysoká cena materiálu elektrod spolu s dlouhou výrobní dobou mohou značně navýšit celkové náklady na EDM hloubení a tudíž i na celkovou

cenu VBD. Kvalita povrchu a geometrická přesnost elektrody ovlivní přesnost budoucího obrobku a to i při použití vychylování elektrod pomocí CNC řízení, které je podstatné pro celkovou efektivnost EDM hloubení.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT Vydavatelství ČVUT, Praha 1989. 122 s.
2. HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
3. HUMÁR, ANTON. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. [online] VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. Dostupné na World Wide Web: <[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl\\_met\\_obr/TI\\_TO-1.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/TI_TO-1.cast.pdf)>.
4. HUMÁR, ANTON. *Technologie I, Technologie obrábění – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. [online] VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. Dostupné na World Wide Web: <[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl\\_met\\_obr/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/TI_TO-3.cast.pdf)>.
5. HUMÁR, ANTON. *Materiály pro řezné nástroje*. Interaktivní multimediální text pro všechny studijní programy FSI. [online] VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. Dostupné na World Wide Web: <[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl\\_met\\_obr/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)>.
6. KOCMAN, K., a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
7. MAŇKOVÁ, I. *Progresívné technologie*. Viena Košice, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
8. *MM Průmyslové spektrum* [DVD Archiv 1997-2007]. Praha: MM publishing, 2008. ISSN 1212-2572.

9. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta technologie obrábění, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9
10. OLEJNÍK, J. *Slinuté karbidy v lisovací technice*. Knižnice strojírenské výroby Státní nakladatelství Praha, 1965. 96 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
d	mm	Rozměr hrubovací elektrody
D	mm	Požadovaný průměr dutiny
EDM		Elektroerozivní obrábění
f	s <sup>-1</sup>	Frekvence výbojů
GAP	mm	Velikost pracovní mezery
h	μm	Hloubka kráteru
HIP		Vysokoteplotní izostatické lisování
I	A	Proud
I <sub>e</sub>	A	Střední vybíjecí proud
K		Součinitel úměrnosti pro katodu a anodu
NbC		Karbid niobu
NMO		Nekonvenční metody obrábění
o	mm	Zaoblení
q	[-]	Veličina časového využití periody výboje
Q <sub>v</sub>	mm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	Celkové množství odebraného materiálu za čas
R <sub>a</sub>	μm	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R <sub>y</sub>	μm	Parametr vlivu tvaru
SK		Slinutý karbid
t <sub>d</sub>	μs	Doba zpoždění výboje
t <sub>e</sub>	μs	Doba výboje
t <sub>i</sub>	μs	Doba impulzu
t <sub>o</sub>	μs	Doba pauzy
T	μs	Doba periody
TaC		Karbid tantalu



TiC		Karbid titanu
$U_e$	V	Střední vybíjecí napětí
$U_k$	V	Napětí při zhasnutí výboje
$U_z$	V	Napětí na prázdkno
VBD		Vyměnitelná břitová destička
$V_i$	mm <sup>3</sup>	Množství odebraného materiálu
WC		Karbid wolframu
$W_i$	J	Energie výboje
$z$	mm	Tloušťka narušeného povrchu
$\vartheta$	%	Relativní opotřebení nástroje
$\eta$	[-]	Účinnost el. výboje

--